

## 基于前导码重传辅助控制的mMTC动态随机接入

申滨<sup>1,2</sup>, 章艳<sup>1,2</sup>, 李昌淼<sup>1,2</sup>, 曾裕<sup>3</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. 上海星思半导体有限责任公司, 上海 201100)

**摘要:** 为解决海量机器类通信 (mMTC, massive machine type communications) 场景下, 机器类通信设备 (MTCD, machine type communication device) 采用传统随机接入方案时, 往往出现网络严重拥塞, 导致大量 MTCD 无法成功接入网络问题, 提出了一种基于前导码重传辅助的动态接入类别限制 (PRT-ACB, preamble retransmission access class barring) 方案。利用 MTCD 的前导码重传次数, 将每个随机接入机会 (RAO, random access opportunity) 中尝试发起接入的 MTCD 划分为高、低优先级, 结合每个 RAO 中负载数估计模型, 分别为其设定随每个 RAO 中的接入负载动态变化的高、低优先级限制因子和可用前导码池, 使更多 MTCD 能在未达到最大前导码传输次数前成功接入网络。仿真结果表明, 所提方案能有效提升 MTCD 的接入成功概率, 降低 MTCD 接入网络所需时延。所提方案可以作为缓解海量通信设备同时接入网络造成拥塞的一种解决方案。

**关键词:** 机器类通信设备; 随机接入; 拥塞控制; 前导码重传次数

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00377

## Preamble retransmission assisted control-based mMTC dynamic random access

SHEN Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Changmiao<sup>1,2</sup>, ZENG Yu<sup>3</sup>

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China  
2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China  
3. Shanghai Xingsi Semiconductor Co., Ltd., Shanghai 201100, China

**Abstract:** To address the issue of severe network congestion in the scenario of massive machine-type communications (mMTC), where machine-type communication devices (MTCD) employing traditional random access schemes often encountered challenges leading to a large number of MTCD failing to access the network successfully, a novel approach called preamble retransmission-based dynamic access class barring (PRT-ACB) was proposed. By utilizing the number of MTCD preamble retransmissions, the MTCD attempting to initiate access in each random access opportunity (RAO) were categorized into different sets of high and low priority. In conjunction with an estimation model for the number of payloads in each RAO, high and low-priority limiting factors and available preamble pools were dynamically adjusted based on the access load in each RAO. This allowed more MTCD to successfully access the network before reaching the maximum number of preamble transfers. Simulation results have demonstrated that the proposed scheme effectively enhances the MTCD successful access rate and reduces the time delay required for MTCD to access the network. The proposed scheme can serve as a solution to alleviate the congestion caused by a massive influx of communication devices attempting simultaneous network access.

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-11-15

通信作者: 申滨, shenbin@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.62071078)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.62071078)

**Key words:** machine type communication device, random access, congestion control, the number of preamble retransmissions

## 0 引言

随着无线通信技术的飞速发展，万物互联已成为通信行业的重要发展方向。为支撑未来大规模机器类通信设备（MTCD, machine type communication device）的应用，5G通信网络将海量机器类通信（mMTC, massive machine type communications）作为重要应用之一，主要面向智能城市、工业4.0、物流、农业、环境监测、医疗健康、安防监控等目标场景提供服务<sup>[1]</sup>。在未来业务中，设备数量极大，mMTC需要具备满足为1平方千米内超过100万个连接提供服务的能力<sup>[2-3]</sup>。mMTC系统中的数据分组短，分组大小可以在10~2 000 byte进行调整，业务具有偶发性和稀疏性特征，数据传输为不规则间歇性传输，数据量通常比较小，并且不同MTCD之间的传输数据量也可能会有很大的差异。MTCD具有小型化、低成本和低功耗特点，便于大规模部署和经济应用。

与mMTC可能面临的瞬时海量随机接入需求相比，现有的移动通信随机接入方案主要针对数据包大、接入量级低的人对人通信进行设计的<sup>[4]</sup>。若将其直接应用于mMTC场景，大量的MTCD在短时间内若同时向基站发起随机接入请求，多个MTCD在同一随机接入机会（RAO, random access opportunity）中选择相同前导码尝试接入的概率增大，造成前导码冲突，导致MTCD接入拥塞严重，接入资源浪费，使得众多MTCD无法成功接入网络<sup>[5]</sup>。

为解决海量设备场景下大量MTCD同时尝试随机接入网络可能带来的拥塞问题，业界提出了多种解决方案，可以大致分为3类：利用定时提前（TA, timing advance）信息辅助<sup>[6-11]</sup>方案、接入等级限制（ACB, access class barring）方案<sup>[12-18]</sup>以及其他方案<sup>[19-28]</sup>。其中，文献[6-11]基于TA信息辅助接入过程控制提高成功接入的MTCD数量。具体而言，文献[6]提出一种新的基于时间对准值的随机接入方案，假设基站有能力记录前一RAO中发起接入尝试的MTCD TA值，且发生前导码碰撞的MTCD在下一RAO中立刻发起接入尝试。基站侧结合前一RAO中所记录的TA值可识别出部分选择了碰撞

前导码的MTCD并为其分配随机接入响应（RAR, random access response）消息。文献[7-8]根据设备与基站的距离对设备进行分组，在此基础上利用TA值进行前导码碰撞区分，减少了设备的碰撞概率。文献[9-11]提出了利用TA值扩展前导码资源的方案，但所提方案仅适用于地理位置固定的设备，并未考虑并非所有的MTCD都能时刻清楚定位自己所处的地理位置。在TA方案中，TA是将传输时延量化为 $16T_c$ 粒度得到的指标值，如果两个MTCD到基站的传播距离差小于 $16CT_c$ ，则TA可能是相同的，其中， $T_c$ 表示NR中最基本的时间单元，C为光速。因此，仅比较TA信息可能不足以减少随机访问过载，因为随着MTCD密度的增加，可能会有更多MTCD具有相同的TA值。

ACB方案是3GPP针对海量MTCD接入网络时所面临的拥塞问题，在TR 37.868中提出的一种拥塞控制方案<sup>[1]</sup>。ACB方案通过调整ACB因子控制同时发起随机接入尝试的MTCD数量，ACB因子表示每个MTCD能发起随机接入尝试的概率阈值。静态ACB方案中的ACB因子为固定值，不仅无法处理接入MTCD数量动态变化的突发情况，还可能导致大量的资源浪费。针对该问题，业界提出了随RAO中的接入MTCD数量动态变化的ACB方案。文献[12]在假设基站已知每个RAO中尝试接入MTCD数量的理想情况下，求解发生前导码碰撞的MTCD数量表达式，对实际场景下的接入限制因子表达式进行优化。文献[13]提出了一种具有动态ACB的非正交多址接入（NOMA, non-orthogonal multiple access）随机接入方案，通过分析每个用户的访问概率估计剩余的MTCD数量以提高MTCD的访问概率。文献[14]根据前3个RAO中碰撞MTCD数量大小，为尝试接入的MTCD分配动态变化的ACB因子以优化MTCD接入网络所需的总时间。文献[15]提出了递归访问类限制（R-ACB, recursive-access class barring）方案，利用贝叶斯方案估计每个RAO的MTCD数量，在考虑物理上行链路共享信道（PUSCH, physical uplink share channel）资源限制以及基站接收到消息1（Msg1, message 1）后能识别出部分前导码碰撞情况下，得到了使接入吞吐量最大的最优ACB因子。文献[16]提出一种Q学

习方案来动态调整 ACB 因子,使基站可以利用本地可用信息快速地响应流量变化。然而,上述方案对于每个 RAO 中 MTCD 数量的估计相对简单,并未深入分析每个 RAO 中设备接入失败的原因,以及设备在某一特定 RAO 中发起重传的概率。这种缺乏深入分析的方法可能导致无法充分理解设备接入失败的原因,从而无法采取有效的措施提高接入成功率。此外,仅通过在时域上扩展 MTCD 发起接入尝试的 RAO,可能会导致设备需要大量的时间才能成功接入网络,甚至可能出现接入超时的情况。

除上述所提两类解决方法以外,还有一些研究提出了其他类型的方案。文献[19]提出通过边缘核心网训练的深度学习神经网络模型估计 TA 值来降低前导码的碰撞概率。文献[20-26]通过强化学习算法提高设备的接入成功率。然而上述两种方法的使用不仅可能会增加设备接入的时延,还可能导致基站处信息处理的复杂度直线上升,目前在实际工程中进行部署也有难度。文献[27]提出了集群方案,假设 MTCD 间可以通过直接通信组成组,每个组内设置一个组头,组头代表组员向基站发起接入请求,减少了同一时间须向基站发送前导码的 MTCD 数量。然而,MTCD 间链路的不稳定性以及组员需要两跳才能接入网络,都表明该方案难以适用于实际场景下的 MTCD 接入网络。文献[28]提出当 MTCD 成功进行随机接入时,MTCD 可以以一定概率为其后续传输数据保留信道,以此来提高系统吞吐量和资源利用率。但对部分资源的保留也表示可用于未接入网络的设备进行随机接入的资源更少,这在原本大量设备接入网络时可用资源数就不足的情况下,进一步降低成功接入网络的设备数,所以在一定程度上该方案并不能达到预期目标。

上述方案虽然在一定程度上能够有效缓解大量 MTCD 同时尝试随机接入网络可能带来的拥塞问题,但都未充分考虑一个关键因素,即 MTCD 发起随机接入的尝试次数对 MTCD 能否成功接入网络的影响。在实际的接入场景中,每个 MTCD 最多只能发起  $N_{\max}^{\text{RT}}$  次随机接入尝试, $N_{\max}^{\text{RT}}$  是由基站通过系统消息广播的 MTCD 前导码最大传输次数。在  $N_{\max}^{\text{RT}}$  次随机接入尝试中都未能成功接入网络的 MTCD,则不再进行随机接入尝试。针对这一点,本文提出了基于前导码重传辅助的动态接入类别限制 (PRT-ACB, preamble retransmission access class

barring) 方案,有效地减少了因前导码传输次数的限制而无法接入网络的 MTCD,提高了 MTCD 的接入成功率,缓解了设备拥塞现象。

具体而言,PRT-ACB 方案分为高、低优先级划分和积压负载数估计两部分,其中前者包含高、低优先级 MTCD ACB 参数动态调整和高、低优先级 MTCD 前导码分配两部分,从而提高成功接入 MTCD 数量。此外,考虑 ACB 参数的动态调整依赖于对活跃 MTCD 数量的估计,推导出了 PRT-ACB 方案下的负载数估计模型,使所提方案能更好地适用于 mMTC 场景下的海量设备接入。该方案的设计思想与具体步骤在第 2~3 节进行了详细阐述,并与现有的典型方案进行了性能对比分析。理论分析与实验结果表明,所提 PRT-ACB 方案可以显著提高 MTCD 的接入成功率,减少 MTCD 因前导码传输次数限制而无法接入网络的情况。

## 1 随机接入模型

### 1.1 传统随机接入流程

在移动通信系统中,MTCD 在传输上行数据前需要进行随机接入过程以获取相应的资源和建立与基站的连接<sup>[29]</sup>。基于竞争的随机接入是指 MTCD 从与其他 MTCD 共享的前导码池中随机选择前导码开启随机接入过程。基于竞争的四步随机接入过程如图 1 所示。

基于竞争的四步随机接入过程具体步骤如下。

1) 前导码传输 Msg1: 发起接入尝试的设备从小区可用前导码资源池中随机选择一个前导码,并在 RAO 中通过物理随机接入信道 (PRACH, physical random access channel) 发送给基站,向基站说明有设备须接入网络。

2) 随机接入响应消息 2 (Msg2, message 2): 基站将接收到的前导码与本地 ZC 序列做互相关,检测 MTCD 发送的前导码。当检测出非碰撞前导码时,需在随机接入响应窗口内通过物理下行链路共享信道 (PDSCH, physical downlink share channel) 向该设备发送 RAR 消息。RAR 包含与检测出的前导码相关的前导码索引 (RAPID, random access preamble ID)、根据检测的前导码相关峰值计算出的设备 TA 值、由设备发送前导码时使用的时频资源得出的随机接入无线网络临时标识 (RA-RNTI, random access-radio network temporary identifier) 以

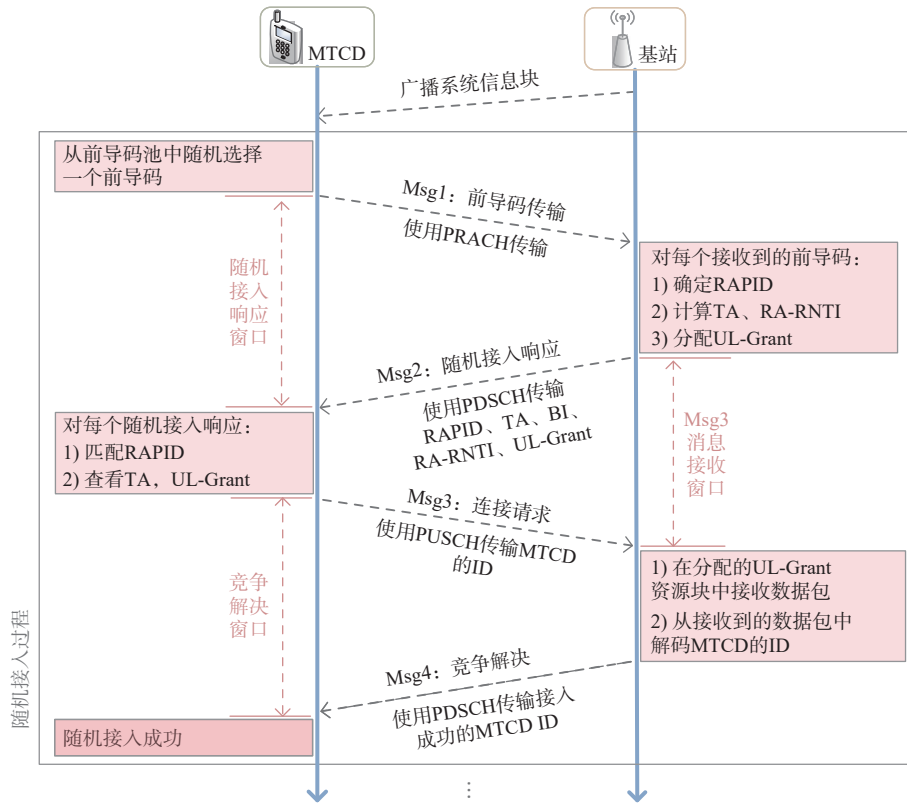


图1 基于竞争的四步随机接入过程

及设备传输消息3 (Msg3, message 3) 时需要的上行授权 (UL-Grant, uplink-grant)。

3) 连接请求 Msg3: 设备根据 Msg2 中包含的 PRAID, 识别出基站侧发送给自己的 RAR, 并对其解码。设备再使用 RAR 所指示的专用 PUSCH 资源向基站发送 Msg3。

4) 竞争解决消息 4 (Msg4, message 4): 在 Msg3 消息接收窗口内, 基站须在发送 Msg2 时分配的 PUSCH 资源中接收并解码设备所发送的 Msg3, 若成功解码 Msg3 则将发送包含设备 ID 的 Msg4。

### 1.2 前导码检测

MTCD 接入过程示例如图 2 所示, 在实际的接入场景中, 基站在接收到第 i 个 RAO 中 MTCD 所发

送的前导码后有如下 4 种检测情况。

1) MTCD 所选择的前导码未被其他 MTCD 同时选择, 且 MTCD 发送前导码时的功率不小于功率检测阈值, 如图 2 中 MTCD 46。

2) MTCD 所选择的前导码未被其他 MTCD 同时选择, 但 MTCD 发送前导码时的功率小于功率检测阈值, 如图 2 中 MTCD 55。

3) MTCD 所选择的前导码被其他 MTCD 同时选择, 且这些 MTCD 之间的地理位置距离超出碰撞检测距离阈值, 如图 2 中 MTCD 3 和 MTCD 4。

4) MTCD 所选择的前导码被其他 MTCD 同时选择, 且这些 MTCD 之间的地理位置距离未超出碰撞检测距离阈值, 如图 2 中 MTCD 1 和 MTCD 2。

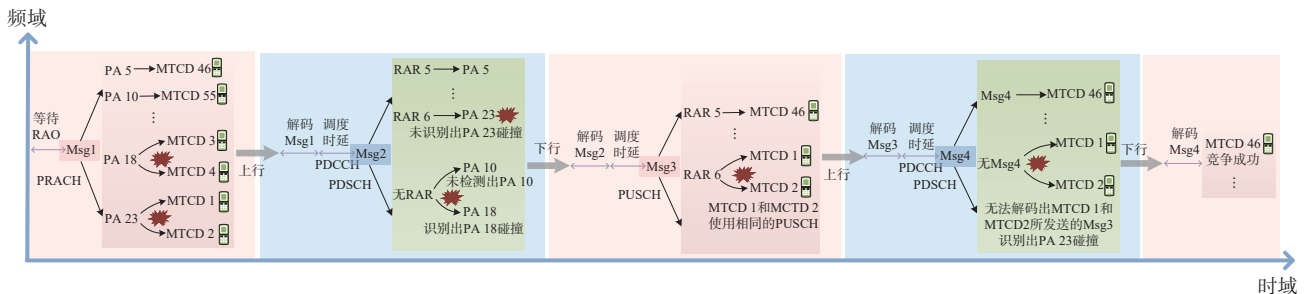


图2 MTCD接入过程示例

## 2 系统模型

### 2.1 改进的 ACB 方案整体随机接入流程

在 3GPP 所提出的 ACB 方案随机接入流程中，基站需要将 ACB 因子和 ACB 限制时间  $T_{acb}$  作为广播消息发送给 MTCD。每个 MTCD 在开始向基站发送前导码前，都需要通过 ACB 检测判断其是否可以在当前 RAO 向基站发起随机接入尝试。传统 ACB 方案如图 3(a)所示，未通过 ACB 检测的 MTCD，须退避  $T_{barring} = [0.7 + 0.6 \times U[0,1)] \times T_{acb}$  时间后方可重新进行 ACB 检测，其中  $U[0,1)$  表示  $0 \sim 1$  之间的均匀随机变量<sup>[1]</sup>。通过了 ACB 检测的 MTCD，则开启基于竞争的四步随机接入过程。此外，如果该类 MTCD 因后续的四步随机接入过程失败而须发起随机接入重传尝试，则无须再通过 ACB 方案的检测，即直接进行图 3(a)中的步骤。

本文提出的 PRT-ACB 方案整体流程如图 3(b)所示。在该方案中，发起随机接入重传尝试的 MTCD 也需要经过 ACB 检测，未通过 ACB 检测的 MTCD 可直接在下一 RAO 中再次发起 ACB 检测。对传统 ACB 方案接入流程进行图 3(b)所示的改进，可以使 ACB 方案不再仅作用于初始发起接入的 MTCD，而是作用于所有未成功接入网络的 MTCD。

此外，在本文所提 PRT-ACB 方案中，MTCD 向基站发送的 Msg3 中还包含 MTCD 前导码传输次数  $n$  ( $1 \leq n \leq N_{max}^{RT}$ )。与传统 ACB 方案相同，在

PRT-ACB 方案中，如果 MTCD 在四步随机接入过程中失败，不论是否需要经过 ACB 检测，都需要均匀回退  $T_{Bo} = U(0, BI)$  时间后方可重新发起接入尝试，其中 BI 为基站定义的回退指标。

3GPP 中所提出的 ACB 是静态 ACB，基站广播的接入限制因子是在  $\{0.05, 0.10, \dots, 0.90, 0.95\}$  中选取的一个值，其不随 RAO 中发起接入尝试的 MTCD 数量变化，且在整个观察时间内 ACB 因子都是固定的。考虑接入规模的动态变化特性，PRT-ACB 方案中的 ACB 因子随每个 RAO 中发起接入尝试的 MTCD 数量动态变化，能更好地适用于 mMTC 场景中的接入流量变化情况。

### 2.2 PRT-ACB 方案随机接入流程

在本文所提的高、低优先级划分方案中，对于第  $i$  个 RAO 发起接入尝试的 MTCD，将前导码传输次数  $n$  不小于该 RAO 中平均前导码传输次数估计值  $\bar{n}_i$  的 MTCD 视为高优先级设备  $M_i^p$ ，反之，则为低优先级设备  $M_i^s$ ，并分别为其设定高优先级接入限制因子  $P_i^{PACB}$ 、低优先级接入限制因子  $P_i^{SACB}$ 。此外，在所提 PRT-ACB 方案中，为保证更多  $M_i^p$  能成功接入网络，为  $M_i^p$  分配整个前导码池  $N$ ，而  $M_i^s$  仅分配部分可用前导码  $N_i^s$ 。PRT-ACB 方案随机接入流程如图 4 所示。

当第  $i-1$  个 RAO 中的接入限制因子  $P_{i-1}^{ACB}$  小于 1 时，则表示需要发起接入尝试的 MTCD 多于可用的前导码数，即该 RAO 发生拥塞。此时，对第  $i$  个

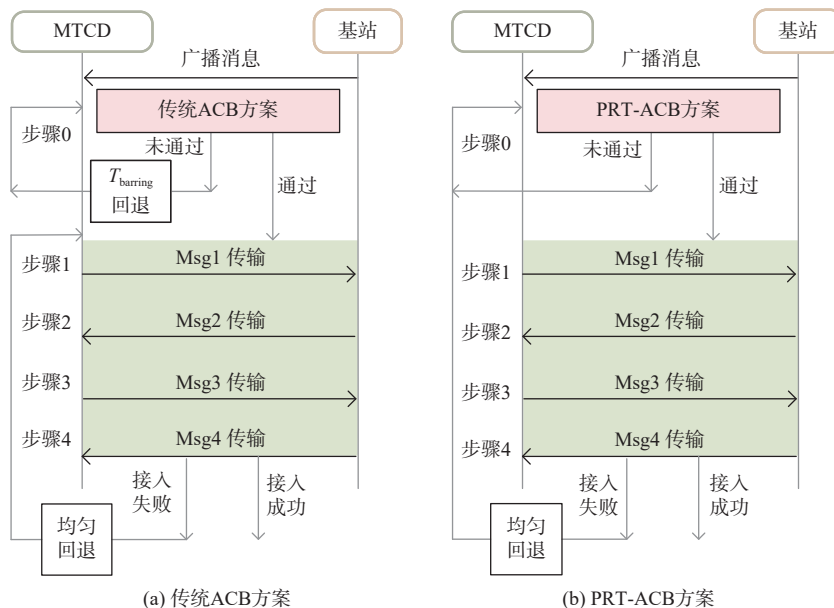


图 3 传统 ACB 方案和 PRT-ACB 方案随机接入流程

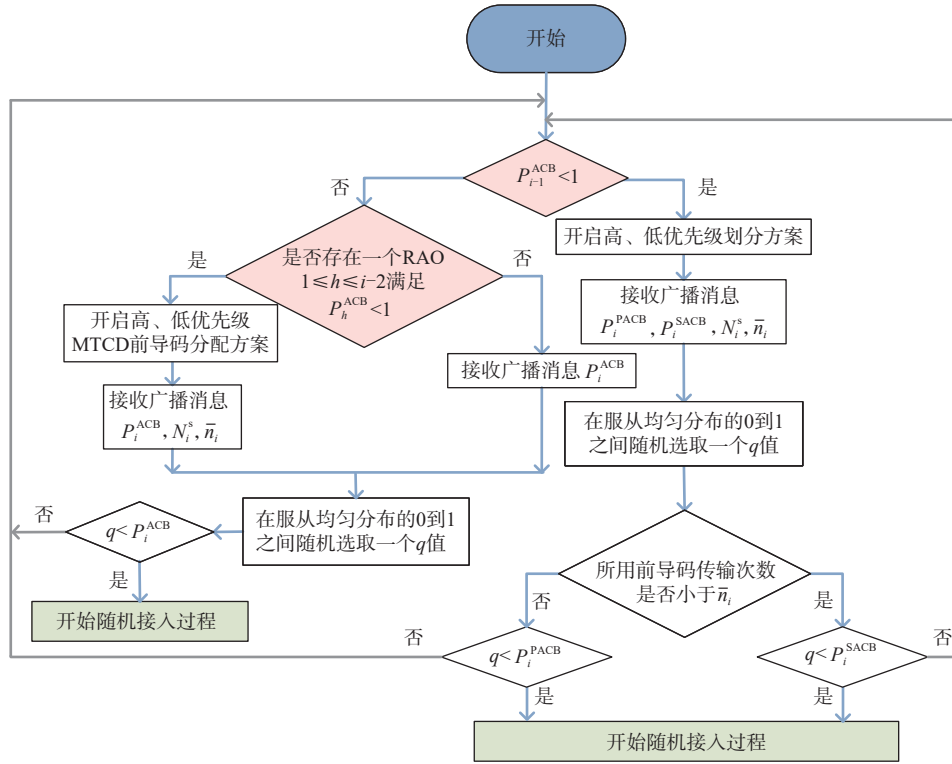


图4 PRT-ACB方案随机接入流程

RAO发起接入尝试的MTC D实施高、低优先级划分方案，基站需要广播包含  $P_i^{PACB}$ 、 $P_i^{SACB}$ 、 $N_i^s$  和  $\bar{n}_i$  的系统消息；当第  $i-1$  个RAO中的接入限制因子  $P_{i-1}^{ACB}$  不小于1，但在之前RAO实施过高、低优先级方案，则仅开启高、低优先级MTC D前导码分配方案，基站需要广播包含  $P_{i-1}^{ACB}$ 、 $N_i^s$  和  $\bar{n}_i$  的系统消息；当第  $i-1$  个RAO中的接入限制因子  $P_{i-1}^{ACB}$  不小于1，且前  $i-2$  个RAO都未实施过高、低优先级划分方案，则基站在  $i$  个RAO中不开启高、低优先级方案；当MTC D成功通过ACB检测，则开启四步随机接入过程。

由于相邻两RAO中前导码传输平均数变化不大，在本文中采用将第  $i-1$  个RAO中实际通过了ACB检测的MTC D平均传输次数  $n_{i-1}^s$  作为第  $i$  个RAO中的前导码传输平均数的估计值  $\bar{n}_i$ 。

### 3 PRT-ACB方案

#### 3.1 高、低优先级划分方案

##### 3.1.1 优化ACB因子以最大限度提高接入吞吐量

ACB因子  $P_i^{ACB}$  对随机接入过程的MTC D拥塞控制起着重要的作用，如何确定  $P_i^{ACB}$  的最优值是发挥ACB拥塞缓解作用的关键。根据定义， $P_i^{ACB}$  为第  $i$  个RAO中发起接入尝试的MTC D通过ACB检

测的阈值。当第  $i$  个RAO中第  $n$  次发起接入尝试的MTC D有  $M_{i,n}$  个时，其中有  $j$  个MTC D通过了ACB检测的概率可表示为

$$P(j|M_{i,n}) = \binom{M_{i,n}}{j} (P_i^{ACB})^j (1 - P_i^{ACB})^{M_{i,n} - j} \quad (1)$$

进一步考虑，每个通过ACB检测的MTC D从  $N$  个可用的前导码中随机选择一个前导码，则对于每个MTC D而言，选择任意一个前导码的概率为  $1/N$ 。令  $F_i^k$  等于0, 1或  $c$ ，分别表示在第  $i$  个RAO中前导码  $k$  没有被任何一个MTC D、恰好被一个MTC D和被多个MTC D所选择的情况。则在第  $i$  个RAO中通过ACB检测的  $j$  个MTC D中只有一个MTC D选择前导码  $k$  的概率为

$$P(F_i^k = 1|j) = \binom{j}{1} \frac{1}{N} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{j-1} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知，当在第  $i$  个RAO中第  $n$  次发起接入尝试的设备有  $M_{i,n}$  个时，仅被其中一个MTC D所选择的前导码总数  $W_{i,n}^1$  为

$$W_{i,n}^1 = M_{i,n} P_i^{ACB} \left(1 - \frac{P_i^{ACB}}{N}\right)^{\sum_{n=1}^{N_{RT}} M_{i,n} - 1} \quad (3)$$

在四步随机接入过程中，如果MTC D传输Msg3的次数超过最大混合自动请求重传次数  $N^{HARQ}$

或Msg3传输成功，但基站发送Msg4的次数超过 $N^{\text{HARQ}}$ ，则该次前导码传输也将以失败告终。用 $P^{\text{msg}}$ 表示MTCD在Msg3或Msg4传输过程中因信道条件而接入失败的概率，可得到

$$P^{\text{msg}} = p_i^{N^{\text{HARQ}}} + \sum_{u=0}^{N^{\text{HARQ}}-1} p_i^u (1-p_i) p_i^{N^{\text{HARQ}}} \quad (4)$$

其中， $p_i$ 表示Msg3或Msg4发送混合自动请求重传的概率。

本文的目标是找出使每个RAO中的吞吐量最大化的接入限制因子，由上述分析可知，第 $i$ 个RAO中的吞吐量 $S_i$ 为

$$S_i = \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} W_{i,n}^1 \rho_n P_i^r (1 - P^{\text{msg}}) \quad (5)$$

其中， $\rho_n = 1 - 1/e^n$ 表示MTCD第 $n$ 次发送Msg1时能被基站检测出的概率。 $P_i^r$ 表示成功发送前导码的MTCD（第1.2节中描述的情况1和情况4）在Msg2处能接收到基站发送包含PUSCH资源的RAR概率。

在随机接入过程中，不仅MTCD传输Msg1的前导码资源是有限的，MTCD传输Msg3所占用的PUSCH资源也是有限的。在不考虑Msg3和Msg4信道传输失败的情况下，在每个RAO中只有当一个前导码被一个MTCD所选择，同时该MTCD收到PUSCH资源授权时，才能成功接入网络，如图2中的MTCD 46。用 $W_i^{\text{nd}}$ 表示在基站接收到Msg1后出现图2中前导码23情况的前导码数，即基站在Msg1处未识别出的碰撞前导码数，可得

$$W_i^{\text{nd}} = (1 - \delta) \left( N - \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} W_{i,n}^1 - W_i^0 \right) \quad (6)$$

其中， $\delta$ 表示第1.2节中描述的情况3发生的概率， $W_i^0$ 表示在第 $i$ 个RAO中MTCD数量为 $M_i = \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} M_{i,n}$ 时，未被任何一个MTCD选择的前导码数。

$$W_i^0 = N \left( 1 - \frac{P_i^{\text{ACB}}}{N} \right)^{M_i} \quad (7)$$

由式(3)和式(6)可知，当每个RAO中可用的PUSCH资源数为 $N^{\text{PUSCH}}$ 时， $P_i^r$ 可表示为

$$P_i^r = \min \left[ 1, \frac{N^{\text{PUSCH}}}{\sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} W_{i,n}^1 \rho_n + W_i^{\text{nd}}} \right] \quad (8)$$

其中， $\sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} W_{i,n}^1 \rho_n$ 表示第 $i$ 个RAO中基站检测到仅被一个MTCD所选择的前导码数。为使吞吐量最

大化，则 $P_i^{\text{ACB}}$ 需满足

$$\frac{dS_i}{dP_i^{\text{ACB}}} = 0 \quad (9)$$

值得说明的是，当 $N \geq M_i$ 时，第 $i$ 个RAO中所有尝试接入的MTCD都可开始四步随机接入过程，不需要通过ACB方案对其进行限制，此时 $P_i^{\text{ACB}}$ 应设置为1。结合式(9)， $P_i^{\text{ACB}}$ 可表示为

$$P_i^{\text{ACB}} = \min \left( 1, \frac{N}{M_i} \right) \quad (10)$$

### 3.1.2 高、低优先级MTCD ACB参数动态调整

在本文所提方案中，考虑为前导码传输次数更靠近 $N_{\text{max}}^{\text{RT}}$ 的MTCD设置更高的ACB因子，使该类MTCD有更大概率可以在当前RAO通过ACB检测，尽可能快地接入网络中。在所提PRT-ACB方案中采用将第 $i-1$ 个RAO中所计算出的高、低优先级MTCD数量作为第 $i$ 个RAO中的估计值。结合第2.2节所述，在第 $i$ 个RAO中发起接入尝试的高、低优先级MTCD数量可表示为

$$\begin{cases} M_i^{\text{p}} = \sum_{n=n_{i-1}^{\text{r}}}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} M_{i-1,n}^{\text{r}} \\ M_i^{\text{s}} = \sum_{n=1}^{n_{i-1}^{\text{r}}-1} M_{i-1,n}^{\text{r}} \end{cases} \quad (11)$$

其中， $M_{i-1,n}^{\text{r}}$ 为第 $i-1$ 个RAO中实际通过了ACB检测的MTCD。

当高优先级MTCD接入限制因子为 $P_i^{\text{PACB}}$ ，低优先级MTCD接入限制因子为 $P_i^{\text{SACB}}$ 时，在第 $i$ 个RAO中可得到

$$M_i P_i^{\text{ACB}} = M_i^{\text{p}} P_i^{\text{PACB}} + M_i^{\text{s}} P_i^{\text{SACB}} \quad (12)$$

本文根据高、低优先级MTCD所使用的前导码传输次数占比来分别为这两类MTCD设定ACB因子。由于相邻两RAO中前导码传输平均数变化不大，本文将第 $i-1$ 个RAO中所计算出的实际MTCD前导码传输次数占总MTCD传输次数的比例作为第 $i$ 个RAO中的估计值，则第 $i$ 个RAO中高优先级MTCD所使用的传输次数占总MTCD传输次数比例 $P_i^{\text{np}}$ 为

$$P_i^{\text{np}} = \frac{\sum_{n=n_{i-1}^{\text{r}}}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} n M_{i-1,n}^{\text{r}}}{\sum_{n=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} n M_{i-1,n}^{\text{r}}} \quad (13)$$

令 $P_i^{\text{PACB}}$ 有如下表达式关系

$$M_i P_i^{\text{ACB}} P_i^{\text{np}} = M_i^{\text{p}} P_i^{\text{PACB}} \quad (14)$$

其中，等式左边表示成功通过ACB检测的MTCD中属于高优先级的MTCD数量，等式右边表示高优先级MTCD中可成功通过高优先级接入限制的MTCD数量。同理可得

$$M_i P_i^{\text{ACB}} (1 - P_i^{\text{np}}) = M_i^s P_i^{\text{SACB}} \quad (15)$$

根据式(14)和式(15)可得出，第*i*个RAO中的高、低优先级接入限制因子表达式为

$$\begin{cases} P_i^{\text{PACB}} = \frac{M_i P_i^{\text{ACB}} P_i^{\text{np}}}{M_i^p} \\ P_i^{\text{SACB}} = \frac{M_i P_i^{\text{ACB}} (1 - P_i^{\text{np}})}{M_i^s} \end{cases} \quad (16)$$

### 3.1.3 高、低优先级MTCD前导码分配

由于每个MTCD仅有 $N_{\text{max}}^{\text{RT}}$ 次可发起随机接入的机会，所以在所提高、低优先级MTCD前导码分配方案中，考虑为低优先级MTCD  $M_i^s$  仅分配部分前导码  $N_i^s$ ，而高优先级MTCD  $M_i^p$  可使用所有前导码  $N$ ，高、低优先级MTCD前导码分配如图5所示。通过减小高优先级MTCD前导码碰撞概率，使高优先级MTCD有更大概率可以在当前RAO通过ACB检测。

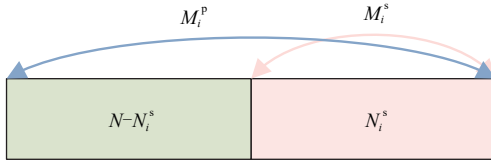


图5 高、低优先级MTCD前导码分配

具体而言，当开启高、低优先级MTCD前导码分配方案时， $N_i^s$ 的计算存在以下两种情况。

1) 当第*i*个RAO未开启高、低优先级MTCD ACB参数动态调整时，表明当前RAO中，总可用前导码数是充足的，所有 $M_i^s$ 都可发起接入请求，此时，可为 $M_i^s$ 个设备分配 $M_i^s$ 个可用前导码，即

$$N_i^s = M_i^s \quad (17)$$

2) 当第*i*个RAO开启高、低优先级MTCD ACB参数动态调整时，表明在当前RAO中，部分MTCD无法成功进行四步随机接入过程。此时，为 $M_i^s$ 个设备分配的前导码可表示为

$$N_i^s = P_i^{\text{SACB}} M_i^s \quad (18)$$

## 3.2 负载数估计模型

MTCD的随机接入初始化请求到达数量，是通过一个在到达时间 $T_{\text{act}}$ 内用 $g(t)$ 表示的概率密度函数来模拟的。在 $T_{\text{act}}$ 持续时间内存在 $I_{\text{act}} = \lfloor T_{\text{act}}/T_{\text{prach}} \rfloor$

个RAO， $T_{\text{prach}}$ 表示相邻两RAO间隔。在第*i*个RAO新到达的MTCD数量 $\lambda_i$ 表示为

$$\lambda_i = \left[ M \int_{t_{i-1}}^{t_i} g(t) \right] \quad (19)$$

其中， $M$ 为需发起接入尝试的MTCD总数， $t_{i-1}$ 为第*i-1*个RAO的结束时间， $t_i$ 为第*i*个RAO的结束时间。

第*i*个RAO中发起接入的MTCD失败情况分析如图6所示，在四步随机接入过程中，通过ACB检测的MTCD可能出现的失败情况如图6蓝色区域所示。因图6中情况6、情况7而导致的MTCD接入失败概率 $P^{\text{msg}}$ 很小，所以在本文的接入负载估计中不考虑因信道条件差，MTCD在Msg3或Msg4传输过程中失败的情况。

具体而言，随机接入MTCD状态转换如图7所示（图中仅描述了部分可能存在的情况）。以第*i*个RAO中进行ACB检测的MTCD举例说明，如图7中黄色区域所示，在第*i*个RAO中进行第一次ACB检测（ $n=1$ ）的MTCD包含 $\lambda_i$ 以及 $M_{i-1,1}^{\text{T1}}$ ，第 $n>1$ 次接入尝试的MTCD应包含 $M_{i-1,n}^{\text{T1}}$ 、 $M_{g,n-1}^{\text{T2}}$ 、 $M_{g,n-1}^{\text{T3}}$ 、 $M_{g,n-1}^{\text{T4}}$ 和 $M_{h,n-1}^{\text{T5}}$ 。积压负载数主要符号及含义见表1。

用 $\eta_{g,i}$ 表示 $M_{g,n-1}^{\text{T2}}$ 、 $M_{g,n-1}^{\text{T3}}$ 和 $M_{g,n-1}^{\text{T4}}$ 选择在第*i*个RAO重新发起ACB检测的概率， $G_{\text{max}}$ 和 $G_{\text{min}}$ 表示RAO  $g$ 的上、下界；用 $\gamma_{h,i}$ 表示 $M_{h,n-1}^{\text{T5}}$ 选择在第*i*个RAO重新发起ACB检测的概率， $H_{\text{max}}$ 、 $H_{\text{min}}$ 表示RAO  $h$ 的上、下界。则第*i*个RAO中发起第*n*次接入尝试的MTCD总数可表示为

$$M_{i,n} = \begin{cases} \lambda_i + M_{i,n}^{\text{T1}}, & n = 1 \\ M_{i-1,n}^{\text{T1}} + \sum_{g=G_{\text{min}}}^{G_{\text{max}}} \eta_{g,i} (M_{g,n-1}^{\text{T2}} + M_{g,n-1}^{\text{T3}} + M_{g,n-1}^{\text{T4}}) + \sum_{h=H_{\text{min}}}^{H_{\text{max}}} \gamma_{h,i} M_{h,n-1}^{\text{T5}}, & 2 \leq n \leq N_{\text{max}}^{\text{RT}} \end{cases} \quad (20)$$

## 4 性能分析

本文定义了3个性能指标评估所提方案的性能。在详细介绍之前，首先分析MTCD的接入情况。

1) 在第*i*个RAO前未开启高、低优先级划分方案时，第*i*个RAO中发起第*n*次接入尝试的MTCD成功完成随机接入的MTCD数量 $M_{i,n}^{\text{RS}}$ 可表示为

$$M_{i,n}^{\text{RS}} = M_{i,n} P_i^{\text{ACB}} \left( 1 - \frac{P_i^{\text{ACB}}}{N} \right)^{\sum_{l=1}^{N_{\text{max}}^{\text{RT}}} M_{i,l} - 1} \rho_n P_i (1 - P^{\text{msg}}) \quad (21)$$

则在第*i*个RAO中传输成功的MTCD数量 $M_i^{\text{RS}}$ 为

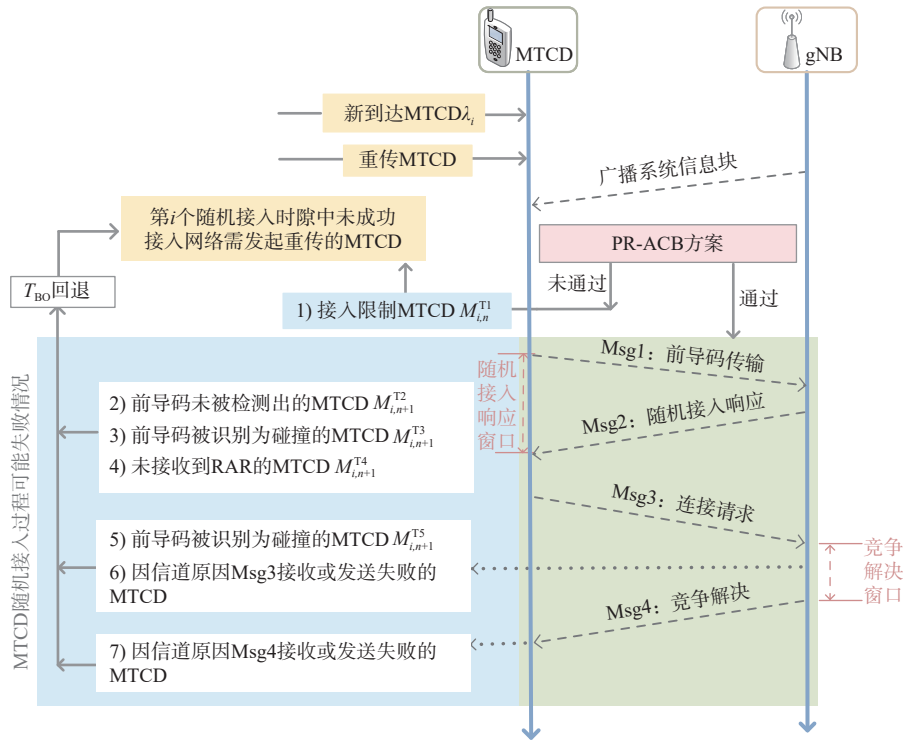


图6 第*i*个RAO中发起接入的MTCD失败情况分析

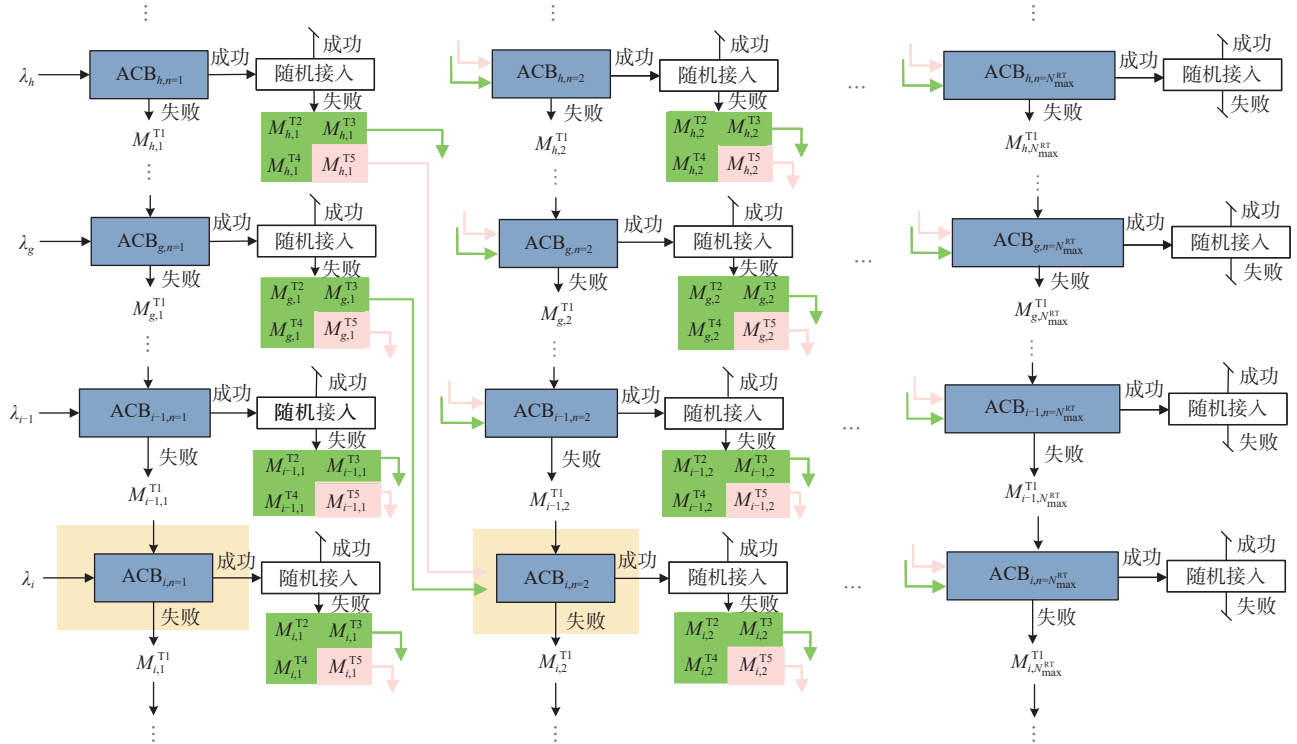


图7 随机接入MTCD状态转换

$$M_i^{RS} = \sum_{n=1}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^{RS} \quad (22)$$

由此可知，第*i*个RAO中传输失败的MTCD数量  $M_i^{RF}$  为

$$M_i^{RF} = M_i - M_i^{RS} \quad (23)$$

2) 若在第*i*个RAO实施了高、低优先级划分方案，则在第*n*次 ( $1 \leq n \leq \bar{n} - 1$ ) 接入尝试的低优先级MTCD中，成功完成随机接入的MTCD总数

表1

积压负载数主要符号及含义

符号	含义
$M_{i-1,n}^{T1}$	在第 $i-1$ 个RAO中第 $n$ 次发起接入尝试但未通过ACB检测的MTCD
$M_{g,n-1}^{T2}$	在第 $g$ 个RAO中进行第 $n-1$ 次前导码传输时,因出现了第1.2节中情况2而需要重新发起ACB检测的MTCD
$M_{g,n-1}^{T3}$	在第 $g$ 个RAO中进行第 $n-1$ 次前导码传输时,因出现了第1.2节中情况3而需要重新发起ACB检测的MTCD
$M_{g,n-1}^{T4}$	在第 $g$ 个RAO中进行第 $n-1$ 次前导码传输时,因未能接收到RAR而需要重新发起ACB检测的MTCD
$M_{h,n-1}^{T5}$	在第 $h$ 个RAO中进行第 $n-1$ 次前导码传输时,因在Msg3处识别出MTCD发生前导码碰撞需要重新发起ACB检测的MTCD

$M_{i,n}^{SRS}$  可表示为

$$M_{i,n}^{SRS} = M_{i,n}^s P_i^{SACB} \left(1 - \frac{P_i^{SACB}}{N_i^s}\right)^{\sum_{s=1}^{i-1} M_{i,n}^s - 1} \rho_n P_i^r (1 - P^{msg}) \quad (24)$$

其中,  $M_{i,n}^s$  表示在第  $i$  个RAO中发起第  $n$  次接入尝试的低优先级MTCD总数。

同理,在实施了高、低优先级划分方案后,第  $i$  个RAO中对于发起第  $n$  次 ( $\bar{n} \leq n \leq N_{max}^{RT}$ ) 接入尝试的高优先级MTCD中成功接入网络的MTCD数量  $M_{i,n}^{PRS}$  可表示为

$$M_{i,n}^{PRS} = M_{i,n}^p P_i^{PACB} \left(1 - \frac{P_i^{PACB}}{N}\right)^{\sum_{s=\bar{n}}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^p - 1} \rho_n P_i^r (1 - P^{msg}) \quad (25)$$

其中,  $M_{i,n}^p$  表示在第  $i$  个RAO中发起第  $n$  次接入尝试的高优先级MTCD总数。

即在实施高、低优先级划分方案后,第  $i$  个RAO中成功完成随机接入的MTCD总数  $M_i^{RS}$  可表示为

$$M_i^{RS} = \sum_{n=1}^{\bar{n}-1} M_{i,n}^{SRS} + \sum_{n=\bar{n}}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^{PRS} \quad (26)$$

由式(24)和式(25)可得,在实施了高、低优先级划分方案后,第  $i$  个RAO中未能成功完成随机接入过程的MTCD总数  $M_i^{PS-RF}$  为

$$M_i^{PS-RF} = M_i - \sum_{n=1}^{\bar{n}-1} M_{i,n}^{SRS} + \sum_{n=\bar{n}}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^{PRS} \quad (27)$$

3) 若在第  $i$  个RAO仅开启高、低优先级MTCD前导码分配方案,则第  $n$  次接入尝试的高、低优先级MTCD中成功接入网络的MTCD数量  $M_{i,n}^{PRS}$  和  $M_{i,n}^{SRS}$  可分别表示为

$$M_{i,n}^{PRS} = M_{i,n}^p P_i^{ACB} \left(1 - \frac{P_i^{ACB}}{N}\right)^{\sum_{s=\bar{n}}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^p - 1} \rho_n P_i^r (1 - P^{msg}) \quad (28)$$

$$M_{i,n}^{SRS} = M_{i,n}^s P_i^{ACB} \left(1 - \frac{P_i^{ACB}}{N_i^s}\right)^{\sum_{s=1}^{i-1} M_{i,n}^s - 1} \rho_n P_i^r (1 - P^{msg}) \quad (29)$$

在此情况下的  $M_i^{RS}$  和  $M_i^{PS-RF}$  可分别用式(26)和式(27)表示。

本文所涉及的3个性能指标定义如下。

1) 随机接入成功概率: 随机接入成功概率  $P^S$  定义为成功完成随机接入过程的MTCD总数与需

接入网络的MTCD总数的比值。用  $T_s$  表示整个观察时间,  $I_s = \lfloor T_s / T_{prach} \rfloor$  表示在观察时间内的可用RAO数。可得到在整个观察时间内,随机接入成功概率  $P^S$  为

$$P^S = \frac{\sum_{i=1}^{I_s} M_i^{RS}}{M} \quad (30)$$

2) 前导码碰撞概率: 前导码碰撞概率  $P^C$  定义为在整个观察时间内,两个或两个以上MTCD在同一RAO中发送相同前导码的前导码数与在整个观察时间内总可用前导码数之比

$$P^C = \frac{\sum_{i=1}^{I_s} \left[ N - \sum_{n=1}^{N_{max}^{RT}} W_{i,n}^1 - W_i^0 \right]}{I_s N} \quad (31)$$

3) 平均接入时延: 平均接入时延  $\bar{D}$  定义为成功完成随机接入的MTCD从被激活到成功接入网络之间的持续时间

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{I_s} \sum_{n=1}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^{RS} \bar{T}_n}{\sum_{i=1}^{I_s} \sum_{n=1}^{N_{max}^{RT}} M_{i,n}^{RS}} \quad (32)$$

其中,  $\bar{T}_n$  表示第  $n$  次发起接入尝试的MTCD成功完成四步随机接入过程所需平均总时延。如果一个MTCD在第  $n$  次发起接入尝试时成功接入网络,那么该MTCD将经历从其第  $n-1$  次接入失败到第  $n$  次接入成功之间的时延。因此,可以将  $\bar{T}_n$  表示为

$$\bar{T}_n = (n-1) \bar{T}^{RF} + \bar{T}^{RS} \quad (33)$$

其中,  $\bar{T}^{RF}$  和  $\bar{T}^{RS}$  分别表示通过ACB检测发起前导码接入的MTCD随机接入失败和随机接入成功所需平均时延。需要注意的是,这两者都包含MTCD通过ACB检测所需的时延。

## 5 仿真结果及分析

在仿真实验中将本文所提方案与多个现有典型方案进行了比较,包括传统方案<sup>[30]</sup>、最优静态ACB方案<sup>[31]</sup> ( $T_{acb} = 4$  s,  $P^{ACB} = 0.5$ ) 和R-ACB方案<sup>[15]</sup>。

为更好地仿真海量 MTCD 进行随机接入时的现实场景，如本文第 1.2 节所描述的，对第  $n$  次发起接入尝试的 MTCD，在基站处有  $\rho_n$  的概率无法检测出其所发送的前导码，且基站在接收到 MTCD 发送的 Msg1 后有  $\delta$  的概率能因为在同一 RAO 中发送相同前导码的 MTCD 距离大于距离检测阈值  $D = 16T_c$  而识别出前导码发生碰撞。在静态最优 ACB 方案和传统方案中都仅认为基站在接收到 MTCD 发送的 Msg1 后可识别出所有发生碰撞的前导码。对于 PRT-ACB 方案，本文分别在基站以  $\delta = 0.2^{[15]}$  和  $\delta = 1$  的概率识别出某一前导码是否发生碰撞的情况下进行仿真。此外，由于信道的原因，对于每一次 Msg3 和 Msg4 的传输和接收，在本文中考虑 MTCD 和基站都有 10% 的概率无法完成 Msg3 和 Msg4 的传输和接收。仿真主要参数配置见表 2。

表 2 仿真主要参数配置

参数	数值
MTCD 到达模型	均匀分布、Beta 分布
MTCD 总数	5 000~50 000
MTCD 激活时间	10 s
退避窗口大小 BI	20 ms
连续 RAO 间隔	5 ms
可用前导码数	30~80
前导码最大传输次数	10
可用 RAR 消息数	10~50
Msg3 与 Msg4 重传概率	10%
$\delta$	0.2、1

当  $N = 54$ 、 $N^{\text{PUSCH}} = 15$  时随机接入成功概率如图 8 所示，可以看出，随着需要接入网络的 MTCD 数量增加，所有方案的接入成功概率都在降低，但所提 PRT-ACB 方案在  $\delta = 1$  的情况下取得的接入成功概率是最优的，且远优于传统方案。PRT-ACB 方案在  $\delta = 1$  的情况下相较于  $\delta = 0.2$  所获得的 MTCD 接入成功率更优是因为后者表示基站在 Msg1 处只能识别出部分碰撞前导码，导致部分碰撞前导码在 Msg3 处占用 PUSCH 资源，造成资源的浪费，降低了 MTCD 的接入成功概率。此外，PRT-ACB 在  $\delta = 0.2$  的情况下所取得的接入成功概率优于文献[15]所提的 R-ACB 方案，因此可以推断，PRT-ACB 方案可以使更多 MTCD 能在达到最大前导码传输次数前接入网络，减少了因 MTCD 前导码传输次数限制而无法再次发起接入尝试的 MTCD 数量，提高了 MTCD 的接入成功概率。

当  $N = 54$ 、 $N^{\text{PUSCH}} = 15$  时前导码碰撞概率如图 9

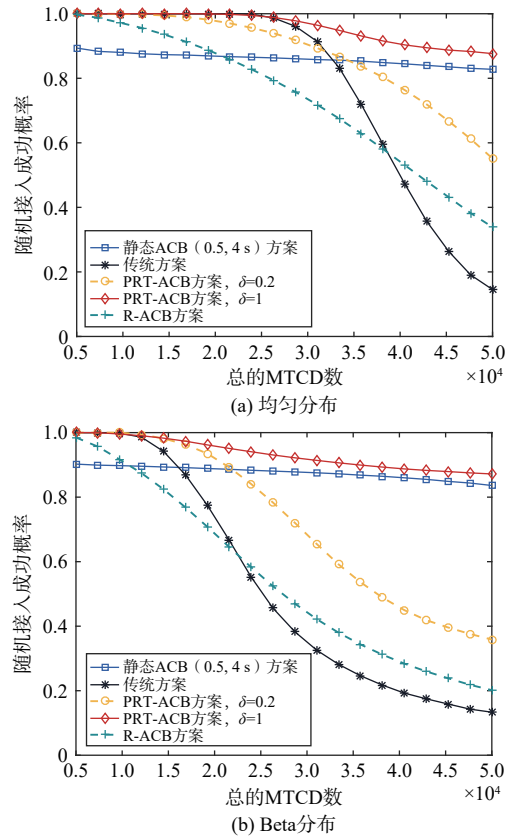


图 8  $N = 54$ 、 $N^{\text{PUSCH}} = 15$  时随机接入成功概率

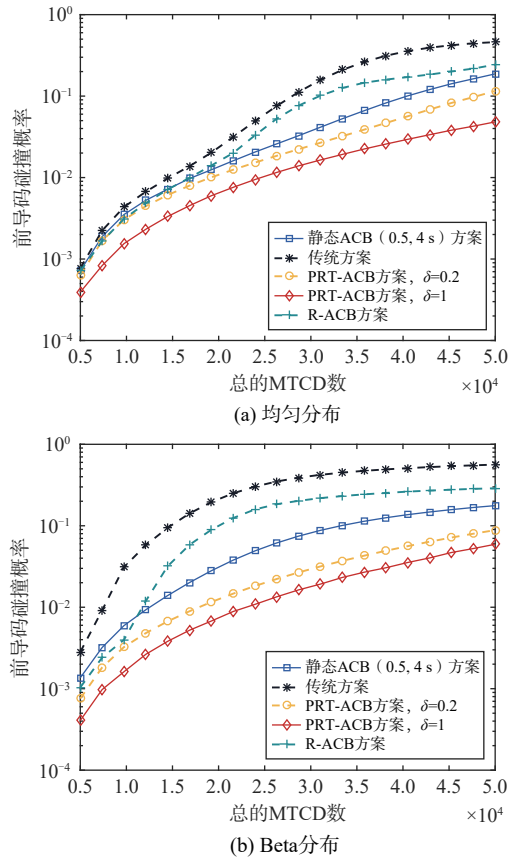


图 9  $N = 54$ 、 $N^{\text{PUSCH}} = 15$  时前导码碰撞概率

所示。对于所有结果，由于需要发起接入尝试的MTCD总数增加，每个RAO中竞争前导码资源的MTCD数量也将增加，这就直接导致了前导码碰撞概率的增加。在所有的仿真结果中，PRT-ACB方案在 $\delta = 1$ 的情况下所获得的前导码碰撞概率最低。此外，均匀分布模型下，当MTCD数量大于20 000时，文献[15]所提的R-ACB方案的前导码碰撞概率高于PRT-ACB方案在 $\delta = 0.2$ 的情况下所获得的前导码碰撞概率。Beta分布模型下，文献[15]所提的R-ACB方案的前导码碰撞概率一直高于PRT-ACB方案在 $\delta = 0.2$ 的情况下所获得的前导码碰撞概率。综合来说，所提方案结合负载数估计模型能更好地估计每个RAO中发起接入尝试的MTCD数量，计算出更符合实际接入情况的接入限制因子，减小每个RAO中发生碰撞的MTCD数量。

当 $N = 54$ 、 $N^{\text{PUSCH}} = 15$ 时平均接入时延如图10所示。其中，传统方案的平均接入时延随MTCD数量的增加而逐渐稳定在65 ms左右，这是因为传统方案在海量MTCD接入时的接入成功概率低，大量MTCD都未能成功接入网络中。R-ACB方案的

MTCD接入成功概率低也使该方案下的MTCD平均接入时延较低。所提方案给予更多MTCD可以成功接入网络的机会，增加了成功接入网络的MTCD数量，进而使MTCD成功接入网络所需时延增加。

现有方案与PRT-ACB方案在不同可用前导码数和可用RAR数下的随机接入成功概率如图11和图12所示，可以看出，随着可用资源的增加，各方案的接入成功概率也都不断增加最终逐渐趋于稳定。然而，从图11和图12可观察到Beta分布模型下所有方案都无法达到100%的接入成功概率，这是因为MTCD的接入同时受限于前导码数和RAR资源，若仅提升前导码数或RAR资源则无法满足Beta分布模型下大量的设备接入需求。

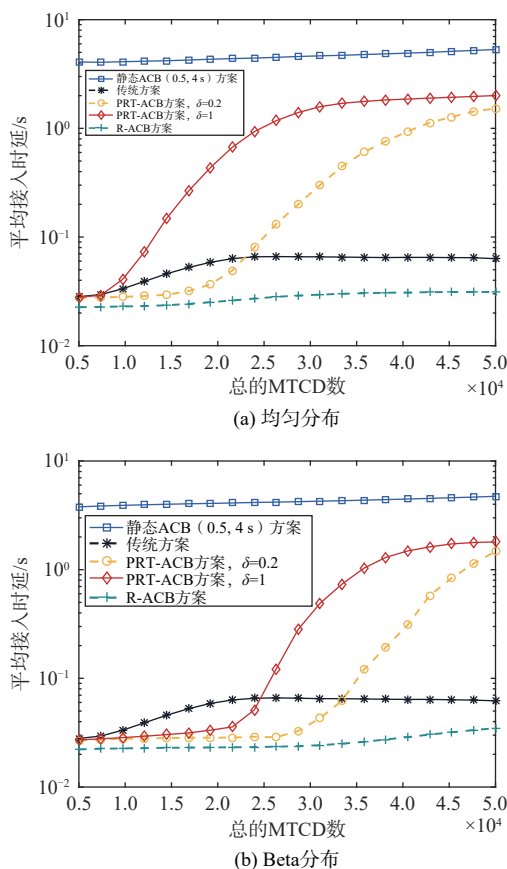


图10  $N = 54, N^{\text{PUSCH}} = 15$ 时平均接入时延

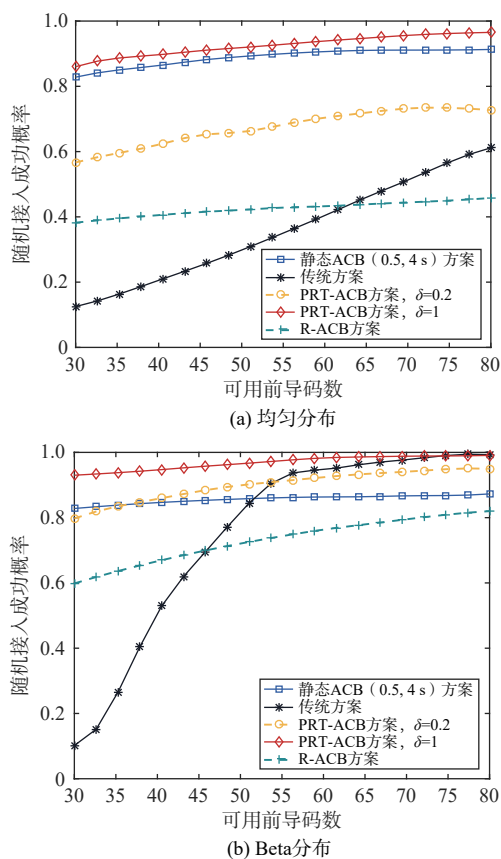


图11  $M = 30\,000, N^{\text{PUSCH}} = 15$ 时可用前导码数对随机接入成功概率的影响

## 6 结束语

本文提出了一种基于MTCD前导码重传辅助控制的动态随机接入方案，以有效缓解mMTC场景下MTCD接入拥塞问题。该方案在传统ACB方案的基础上提出了高、低优先级划分方案，其根据

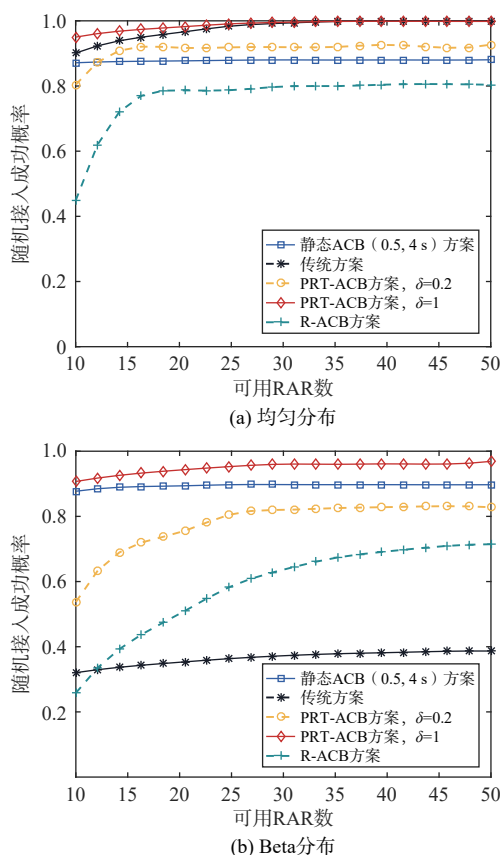


图12  $M = 30\ 000$ 、 $N = 54$ 时可用RAR数对随机接入成功概率的影响

前导码传输次数将MTCD划分高、低优先级，并分别为其设定随每个RAO负载动态变化的ACB因子和可用前导码池，使更多MTCD能在前导码传输次数达到最大值前成功接入网络。考虑ACB因子是根据接入负载动态变化的，结合所提PRT-ACB方案下的负载数估计模型，推导了随RAO中积压设备数动态变化的ACB因子。理论推导与实验结果分别从MTCD接入成功概率、前导码碰撞概率和MTCD平均接入时延3个方面对所提方案进行分析和评估。仿真结果表明，所提方案能有效缓解海量MTCD接入网络造成的拥塞情况，尤其是当大量MTCD突发集中进行接入时，所提方案接入成功概率与传统方案、最优静态ACB方案以及R-ACB方案相比都有显著的提升，实现了对随机接入系统的性能优化。

#### 参考文献:

[1] 3GPP. Study on RAN improvements for machine-type communications: TR 37.868[S]. 2011.  
 [2] ZHENG K, OU S L, ALONSO-ZARATE J, et al. Challenges of massive access in highly dense LTE-advanced networks with

machine-to-machine communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 12-18.  
 [3] CHEN X M, NG D W K, YU W, et al. Massive access for 5G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(3): 615-637.  
 [4] LAYA A, ALONSO L, ALONSO-ZARATE J. Is the random access channel of LTE and LTE-a suitable for M2M communications? A survey of alternatives[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 4-16.  
 [5] 3GPP. Service requirements for machine-type communications (MTC): TS 22.368[S]. 2020.  
 [6] ZHANG J W, XIE D H, WANG X D. TARA: an efficient random access mechanism for NB-IoT by exploiting TA value difference in collided preambles[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(3): 1110-1123.  
 [7] 吴哲夫, 杨鑫源, 翟文超, 等. 面向差异化MTC场景需求的随机接入方案[J]. 通信学报, 2020, 41(11): 176-184.  
 WU Z F, YANG X Y, ZHAI W C, et al. Random access scheme for different MTC scenario requirement[J]. Journal on Communications, 2020, 41(11): 176-184.  
 [8] HOU Y, YI H Y, ZHANG W X, et al. NORA based group paging overload control method for massive MTC accesses under 5G networks[C]//Proceedings of 2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 692-697.  
 [9] LEE B H, LEE H S, MOON S, et al. Enhanced random access for massive-machine-type communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 7046-7064.  
 [10] WANG Z H, WONG V W S. Joint access class barring and timing advance model for machine-type communications[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 2357-2362.  
 [11] WANG Z H, WONG V W S. Optimal access class barring for stationary machine type communication devices with timing advance information[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5374-5387.  
 [12] DUAN S Y, SHAH-MANSOURI V, WANG Z H, et al. D-ACB: adaptive congestion control algorithm for bursty M2M traffic in LTE networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9847-9861.  
 [13] HU Y M, PENG L, LIU Y. Design and analysis of a dynamic access class barring NOMA random access algorithm[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(12): 3054-3058.  
 [14] DUAN S Y, SHAH-MANSOURI V, WONG V W S. Dynamic access class barring for M2M communications in LTE networks[C]//Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2014: 4747-4752.  
 [15] JANG H S, JIN H, JUNG B C, et al. Resource-optimized recursive access class barring for bursty traffic in cellular IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(14): 11640-11654.

- [16] TELLO-OQUENDO L, PACHECO-PARAMO D, PLA V, et al. Reinforcement learning-based ACB in LTE-a networks for handling massive M2M and H2H communications[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [17] ABERA W, OLWAL T, MARYE Y, et al. Learning based access class barring for massive machine type communication random access congestion control in LTE-a networks[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-7.
- [18] AMITU D M, AKOL R N, SERUGUNDA J. Resilient access control mechanism for massive machine type communications[C]//Proceedings of 2023 IEEE World AI IoT Congress (AllIoT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 620-626.
- [19] KIM J, LEE G, KIM S, et al. Two-step random access for 5G system: latest trends and challenges[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 273-279.
- [20] ALAVIKIA Z, GHASEMI A. Collision-aware resource access scheme for LTE-based machine-to-machine communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4683-4688.
- [21] CHEN Y W, CHANG C H. Effective uplink data transmission scheme for MTCs in LTE-a networks[C]//Proceedings of 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [22] YANG Z H, WANG Y C, WANG Z N, et al. Power back-off based non-orthogonal random access scheme for massive MTC networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [23] YOUN J, PARK J, KIM S, et al. MARL-based random access scheme for delay-constrained mMTC in 6G[C]//Proceedings of 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [24] CHEN Z Q, SMITH D B. Heterogeneous machine-type communications in cellular networks: random access optimization by deep reinforcement learning[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [25] ORIM P, VENTURA N, MWANGAMA J. Random access scheme for machine type communication networks using reinforcement learning approach[C]//Proceedings of 2023 IEEE AFRICON. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [26] BAI J N, SONG H, YI Y, et al. Multiagent reinforcement learning meets random access in massive cellular Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17417-17428.
- [27] CHATZIKOKOLAKIS K, KALOXYLOS A, SPAPIS P, et al. On the way to massive access in 5G: challenges and solutions for massive machine communications[C]//Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks. Cham:

Springer, 2015: 708-717.

- [28] LIU J, SEO J B, JIN H. Online transmission control for random access with multipacket reception and reservation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(22): 23160-23175.
- [29] ALI M S, HOSSAIN E, KIM D I. LTE/LTE-a random access for massive machine-type communications in smart cities[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(1): 76-83.
- [30] WEI C H, BIANCHI G, CHENG R G. Modeling and analysis of random access channels with bursty arrivals in OFDMA wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(4): 1940-1953.
- [31] TELLO-OQUENDO L, LEYVA-MAYORGA I, PLA V, et al. Performance analysis and optimal access class barring parameter configuration in LTE-a networks with massive M2M traffic[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3505-3520.

#### [作者简介]



申滨(1978–)，男，博士，重庆邮电大学通信与信息工程学院教授，主要研究方向为下一代移动通信、大规模MIMO系统、认知无线电、海量机器类通信设备的随机接入等。



章艳(1999–)，女，重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为海量机器类通信设备的随机接入。



李昌淼(1998–)，男，重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为卫星场景下的通信同步、海量机器类通信设备的随机接入。



曾裕(1994–)，男，上海星思半导体有限责任公司工程师，主要研究方向为5G、6G移动通信技术。