

## 一种基于随机接入时机动态分配的接入方案

景少雄, 袁悦, 熊家炜, 王军选

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

**摘要:** 随着物联网 (IoT, internet of things) 的快速发展, 机器类型通信 (MTC, machine type communication) 在生活中的应用大幅增长, 机器类设备 (MTD, machine type device) 的部署也越来越密集。在这种情况下, 如果发生断电断网等突发情况, 在设备通电的瞬间将会有大规模的 MTD 同时向基站发起接入, 设备接入基站需要完成下行同步、接收系统消息和随机接入 (RA, random access) 等过程。然而基站所能分配的前导资源是有限的, 无法满足如此庞大的接入需求, 从而造成网络阻塞, 影响设备的接入概率和接入时延。为了减轻 RA 的接入冲突, 提出了一种基于上下行子帧和物理随机接入信道 (PRACH, physical random access channel) 配置的动态随机接入时机 (RO, random access occasion) 调整方案, 以及针对时延要求高的部分 MTD 分配特定的前导资源, 仿真结果表明该方案能够有效提高系统的吞吐量, 降低设备的接入时延。

**关键词:** 机器类型通信; 随机接入; RO 动态分配; 接入时延

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00266

## An access scheme based on the random access occasion dynamic allocation

JING Shaoxiong, YUAN Yue, XIONG Jiawei, WANG Junxuan

School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

**Abstract:** With the rapid development of the internet of things (IoT), the application of machine type communication (MTC) in life has grown substantially, and the deployment of machine type devices (MTD) has become more and more intensive. In this case, if there is an unexpected situation such as a power outage and a network failure, a large-scale MTD will initiate access to the base station at the same time when the device is powered on. When the device accesses the base station, it needs to complete the downlink synchronization, system message receiving, random access (RA) and other processes. However, the preamble resources that can be allocated by the base station are limited and cannot meet such a huge access demand, which causes network congestion and affects the access probability and access delay of the device. In order to alleviate the access conflict of RA, a dynamic random access occasion (RO) adjustment scheme was proposed based on the uplink and downlink subframes and physical random access channel (PRACH) configuration, and time-based part of the MTD with high delay requirements allocates specific preamble resources. The simulation results show that this scheme can effectively improve the throughput of the system and reduce the access delay of the device.

**Key words:** MTC, random access, RO dynamic allocation, access delay

### 0 引言

随着物联网 (IoT, internet of things) 技术的快

速发展与广泛应用, 机器到机器 (M2M, machine to machine) 通信备受关注。M2M 通信作为物联网中的关键技术, 目标是在尽可能少的人为干预的情况

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2022-02-22

通信作者: 景少雄, 786700648@qq.com

下自主实现机器与机器之间的通信<sup>[1]</sup>。据相关统计,预计到 2025 年, IoT 设备的数量将达到 200 亿台,从而真正走进万物互联的时代<sup>[2]</sup>。3GPP 针对人与人(H2H, human to human)通信已经提出了相对完善的接入标准,这为 M2M 通信提供了现实基础<sup>[3]</sup>。然而不同于 H2H, M2M 通信面临着更多不同的问题与挑战,其中对接入性能影响最为严重的就是机器类设备(MTD, machine type device)部署密集程度远大于普通的用户设备(UE, user equipment), MTD 在面对突发情况时,会出现大规模设备同时发起接入,这将会引起非常激烈的竞争,造成网络的阻塞从而大大降低接入效率<sup>[2]</sup>。同时,在这种断电断网等突发大规模设备同时接入的场景下,部分 MTD 对时延的要求十分敏感,需要快速完成接入,如车联网系统、工业机器物联网设备等,而其他 MTD 如生活智能家居、智能设备等,较长的接入时延对这些 MTD 并不会造成太大的影响,但此时所有 MTD 同时发起随机接入, MTD 公平竞争随机接入资源,因此无法满足这些对时延敏感要求高的设备的服务质量,大大降低了系统的吞吐量,影响日常工作和生活的需求。因此,如何在现有的 H2H 通信技术基础上,设计出更适合 MTD 的随机接入技术显得尤为重要<sup>[3]</sup>。

为了缓解大规模 MTD 同时发起随机接入所导致的网络阻塞问题,近年来已有多个国内外学者提出了一些改进的随机接入(RA, random access)机制。3GPP 针对 IoT 提出了不同的回避时间指示(BI, backoff indicator),在 LTE 或 NR 中,当 UE 发起接入请求 Msg1 后但并没有收到对应的随机接入响应(RAR, random access response)或没有完成冲突解决时,基站会给 UE 分配一个 BI 值,UE 根据 BI 值查表获得一个回避时间范围,然后在 0 到该回避时间值之间随机选择一个值进行回避等待,从而避免大量的 UE 在同一个动态随机接入时机(RO, random access occasion)上发起随机接入从而避免严重的冲突发生<sup>[2]</sup>。由于 IoT 中 MTD 数量的庞大,3GPP 配置了更大的可选 BI 值从而有效地降低冲突发生的概率。文献[4]中所提出的基于退避的策略,给当前网络中发起接入的普通 UE 和其他 MTC 分别设置一个回避退让的时间,从而达到缓解冲突的目的。但该方案仅适用于当前发起接入的设备较少时的场景。当此时发起接入的设备数十分庞大时,该回避退让方案则不能发挥作用<sup>[4]</sup>。文献[5]中提出

了接入控制限制(ACB, access control barring)方案。ACB 方案是在 MTD 完成下行同步进行随机接入之前,基站会给所有 MTD 广播下发一个 ACB 接入控制因子,ACB 控制因子取值范围为 0~1,每个 MTD 同时会产生一个对应的 0~1 的随机数,如果 MTD 产生的随机数小于 ACB 控制因子,则该设备发起随机接入请求与基站完成随机接入连接,如果 MTD 产生的随机数大于 ACB 控制因子,则该 MTD 在这次 RO 放弃发起随机接入请求,当下一个 RO 到来时,重复之前的操作直到完成 ACB 校验才能发起随机接入请求<sup>[5]</sup>。ACB 控制方案本质上就是让每个发起接入的 MTD 以控制因子大小的概率发起接入,从而降低每个 RO 上发起接入的总设备数,以此减少发生冲突的概率。文献[6]在 ACB 控制方案的基础上,提出了一个基于退避预测的 ACB 动态接入新方案,文献[6]根据系统中重传的 MTD 数和状态转移过程估计实时的活跃的 MTD 数,从而建立了一种基于退避预测原则的估计模型,结合建立的估计模型,通过调整 ACB 控制因子,从而能够优化成功接入的设备数,从而提高接入成功率<sup>[6]</sup>。文献[7]提出在设备接入基站之前,基站首先选择该设备是否在该基站发起接入,从而将当前在该基站上同时发起接入的设备分散到其他基站上,从而降低接入冲突,但该方案存在明显的缺陷,只适用于当前环境是多基站的场景<sup>[7]</sup>。以上的方案虽然可以在一定程度上减少冲突的概率,提高 MTD 的接入成功率,但均是通过减少在同一时刻发起随机接入的设备数量来实现的,并没有从根本上解决随机接入资源短缺的问题。

本文首先提出了一种基于上下行子帧和 PRACH 配置的动态 RO 调整方案,在发生断电断网等特殊情况时,根据不同的上下行子帧配置及 PRACH 资源配置,可以动态调整分配用于随机接入的其他上行资源。其次根据地理位置将发起的 MTD 进行聚类,不同簇下的 MTD 选择不同的 RO,实现随机接入前导码(RAP, random access preamble)的复用,从而降低随机接入冲突概率,同时基站根据 MTD 选择的不同的簇可以在该簇指定的 RO 上接收 RAP,省去了盲检的开销。除此之外,针对时延要求高的部分 MTD 分配特定的 RAP,保证时延要求高的 MTD 尽快完成接入,从而提高系统的吞吐量。

## 1 系统模型

### 1.1 随机接入过程

UE 开机后和基站建立连接需要完成基于竞争的随机接入<sup>[8]</sup>。MTD 的随机接入过程类似于 3GPP 协议规定的 LTE 随机接入，同样是在接收到基站广播下发的系统信息块（SIB, system information block）后，通过 4 步完成随机接入，4 步随机接入过程如图 1 所示。

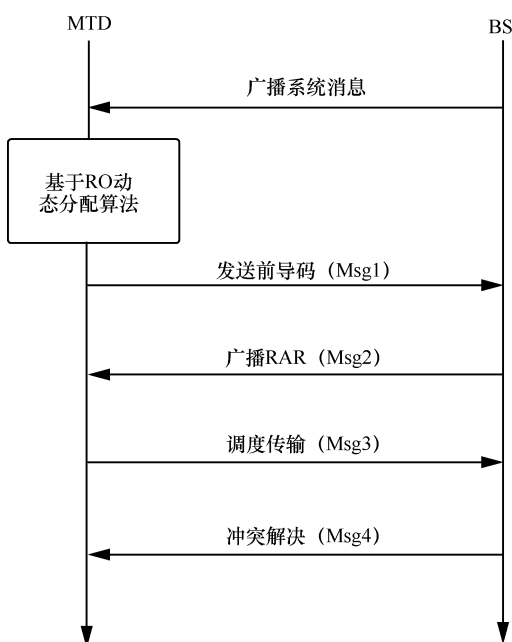


图 1 4 步随机接入过程<sup>[9]</sup>

1) 基站通过系统消息将 PRACH 资源配置广播给 MTD，MTD 选择可用的 PRACH 资源，同时随机选择一个 RAP 在指定的 PRACH 上发起随机接入请求，即 Msg1<sup>[10]</sup>。

2) 基站在 PRACH 上盲检 RAP，在物理下行共享信道（PDSCH, physical downlink shared channel）上下发 RAR，MTD 解码 PDSCH 从而获得自己对应的 RAR<sup>[11]</sup>。

3) MTD 根据 RAR 中的信息确定发送 Msg3 的时频资源<sup>[9]</sup>。如果在第一步有多个 MTD 在同一个 PRACH 上选择了相同的 RAP，则这些 MTD 发生冲突。

4) 如果 MTD 接收到基站返回的冲突解决消息，并且其中携带的标识符与其在之前 Msg3 中上报给基站的相符，则随机接入成功。否则 UE 认为此次接入失败<sup>[12]</sup>。

从以上随机接入步骤可知，如果有大量的 MTD

同时发起随机接入请求，RAP 资源的有限性必然会造成大量的随机接入冲突<sup>[10]</sup>。发生冲突的 MTD 会占用相同的上行资源，由于同信道间的干扰将可能导致基站无法正确接收任一个上行资源，从而所有 MTD 均随机接入失败。因此，当且仅当在同一个 RO 上只有一个 MTD 选择了一个前导码(preamble)，该 MTD 才能完成随机接入。

### 1.2 随机接入成功概率

综上所述，MTD 每次随机接入请求能够成功完成建立的概率为

$$P = \left( \frac{M-1}{M} \right)^{N-1} \quad (1)$$

其中， $M$  为可用的 preamble 数目，且最多为 64 个。 $N$  为在同一 RO 上发起随机接入的 MTD 数目，因此当给定可用 preamble 数量  $M$  时，同一时刻发起随机接入的 MTD 越多，则冲突概率就越大，接入成功的概率越小。

### 1.3 随机接入时延

MTD 完成随机接入的时延主要为首次发起随机接入请求到完成随机接入 RRC 连接建立所经历的时间。由于当 MTD 随机接入失败时，会重新发起随机接入，因此 MTD 的接入时延可以忽略 4 步随机接入的时延，只需要考虑 MTD 首次发起随机接入请求到随机接入成功的这一次发起随机接入请求之间的时延。

### 1.4 吞吐量分析

考虑到发起随机接入的 MTD 中有部分 MTD 是时延敏感设备，即要求随机接入时延比普通 MTD 更低，因此在本文中定义吞吐量为给定仿真时间  $T$  内时延敏感 MTD 接入成功率与非时延敏感 MTD 的接入成功率的加权求和，具体计算式如式(2)。

$$\phi = \frac{x}{n} \cdot w_1 + \frac{y}{N-n} \cdot w_2 \quad (2)$$

其中， $N$  为发起随机接入的 MTD 总数， $n$  为发起随机接入的时延敏感 MTD 数目，则  $N-n$  为非时延敏感的 MTD 数， $x$  为给定仿真时间  $T$  内完成随机接入的时延敏感 MTD 总数， $y$  为给定仿真时间  $T$  内完成随机接入的非时延敏感 MTD 总数， $w_1$  为时延敏感设备吞吐量权值， $w_2$  为非时延敏感设备吞吐量权值。

## 2 动态随机接入时机分配算法

在 MTD 发起随机接入请求前需要完成两个工

作：在生成的可选 preamble 中随机选择一个可用的 preamble；确定 PRACH 的时频位置<sup>[9]</sup>。关于 PRACH 的时域位置，3GPP 中规定按照 SIB2 中 PRACH Configuration Index 的指示进行选择，PRACH 资源分配见表 1。

**表 1 PRACH 资源分配**

物理随机接入信道配置索引	前导码格式	系统帧号	子帧号
0	0	偶数帧	1
1	0	偶数帧	4
2	0	偶数帧	7
3	0	所有帧	1
4	0	所有帧	4
5	0	所有帧	7
6	0	所有帧	1,6
7	0	所有帧	2,7
...	...	...	...

根据 SIB2 中不同的物理随机接入信道配置索引，MTD 可以选择不同子帧发起随机接入。如果索引等于 8，指示了 PRACH 可用的时域资源为在每一系统帧上的 1 号子帧和 6 号子帧。根据 3GPP 协议的规定，在每一系统帧内可用于 PRACH 的时域资源较少，当同一时间在同一系统帧上有大规模的 MTD 发起随机接入时，势必导致大量 MTD 选择同一个子帧，即选择相同的 RO 发起随机接入，使得每个 MTD 随机接入成功概率大大降低。然而在 TDD 中 3GPP 协议规定的每个系统帧内的上下行子帧配比见表 2。

其中，D 是指分配为下行子帧，U 是分配为上行子帧，S 为可灵活配置的子帧。由表 2 可知，根据不同的上行-下行配置，在一个帧内会分配有不同数目的上行子帧，而协议在时域上只给分配了固

定的可用的 PRACH 资源见表 1，然而在 MTD 断电断网等突发情况发生时，此时由于大规模的 MTD 都将用于发起随机接入，从而占用 PRACH 资源<sup>[9]</sup>。综上所述，本文研究内容即在突发情况发生时，将一个系统帧内其他的可用上行子帧用于 PRACH，实现在时域上的 preamble 复用。基于 RO 动态分配方案模型如图 2 所示。

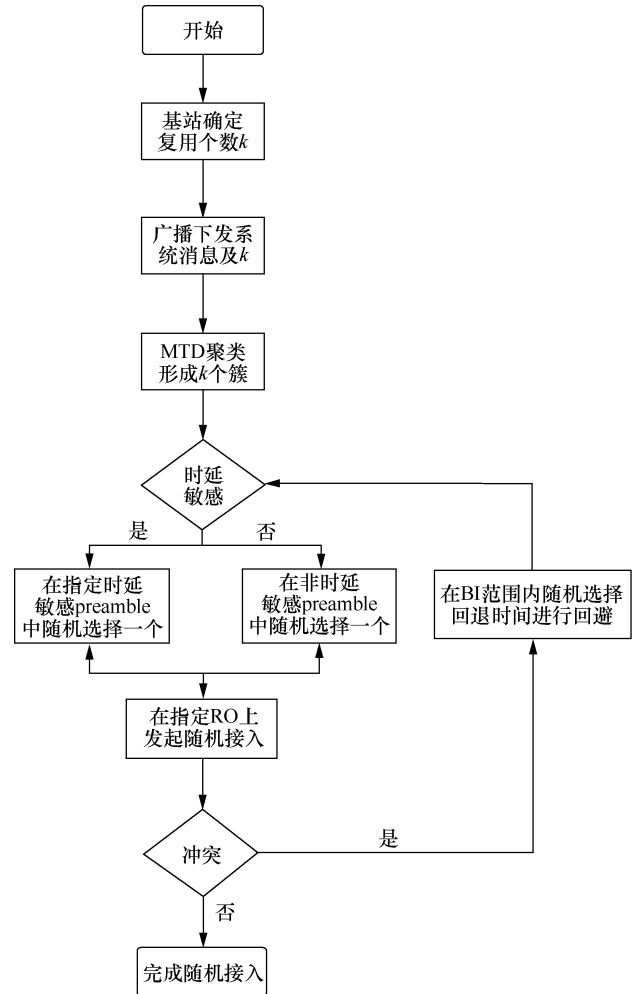


图 2 基于 RO 动态分配方案模型

**表 2 上下行子帧配比**

上行-下行配置	上下行子帧切换周期/ms	子帧号									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

首先，基站根据上下行子帧配比及 PRACH 配置索引确定时域上前导码复用的个数  $k$ ，并广播下发给所有 MTD，所有 MTD 根据自己的位置进行聚类，生成  $k$  个簇。基站给每个簇内的 MTD 分配了确定的 RO，基站在 MTD 所在的簇对应的 RO 上接收 preamble 从而避免盲检的开销。考虑到时延敏感 MTD 对时延要求更高，因此分配固定数目的 preamble 用于时延敏感 MTD 的接入，因此时延敏感 MTD 在指定分配的用于时延敏感设备的 preamble 中随机选择一个，其他 MTD 在剩余的 preamble 中随机选择。随后，MTD 在基站所指定的 RO 上发起随机接入，如果没有其他设备和该 MTD 选择同样的 preamble，则该设备随机接入成功，否则在基站指定的 BI 范围内随机选择一个回避退让时间进行等待，然后重新发起随机接入。

### 3 仿真结果和分析

#### 3.1 仿真环境

仿真环境具体设置如下：为了便于计算与对比，假设  $N$  个 MTD 均在同一个系统帧内的 RO 上发起随机接入，其中时延敏感 MTD 占总 MTD 的 10%，共有  $M$  个 preamble 资源用于基于竞争的随机接入，其中有  $m$  个 preamble 用于时延敏感 MTD 的随机接入，其余的 preamble 用于非时延敏感 MTD 的随机接入。假设基站初始所指示的在一个系统帧内的 RO 个数为 1，BI 值的分配见表 3。

BI 指数	退避参数/ms	MTD 数
0	0	0~250
1	250	250~1 000
2	500	1 000~2 000
3	1 000	2 000~3 000
4	2 000	3 000~4 000

根据不同的 BI 值，基站分配了不同范围的退避时间范围，如当发起随机接入的 MTD 数小于 250 时，当 MTD 随机接入失败时不进行等待，直接在下一个 RO 上再次发起随机接入。当 MTD 数大于 250 时，在指定的退避时间参数范围内随机选择一个等待时间进行退避，之后再重新发起随机接入。仿真具体参数见表 4。

符号	名称	数值
$M$	可用 preamble 总数	64
$m$	用于时延敏感的 preamble	6
$N$	发起随机接入的 MTD 总数	500~4 000
$n$	时延敏感 MTD 总数	10% $\times$ $N$
$w_1$	时延敏感设备权值	0.8
$w_2$	非时延敏感设备权值	0.2

#### 3.2 仿真结果及分析

吞吐量随 MTD 数的变化如图 3 所示，由于本文对吞吐量的定义为：给定仿真时间  $T$  内时延敏感 MTD 接入成功率与非时延敏感 MTD 的接入成功率的加权求和，因此随着发起接入的设备数的增加，系统吞吐量会大幅降低。图中实线为不考虑时延敏感设备，虚线为考虑时延敏感设备，即在每一次发起随机接入的 RO 上为时延敏感设备分配固定的 6 个 preamble 资源，用于时延敏感设备的随机接入。结果表明，由于为时延敏感 MTD 分配了 preamble 资源，因此，能够保证时延敏感 MTD 的优先接入，从而实现系统吞吐量的小幅度提升。

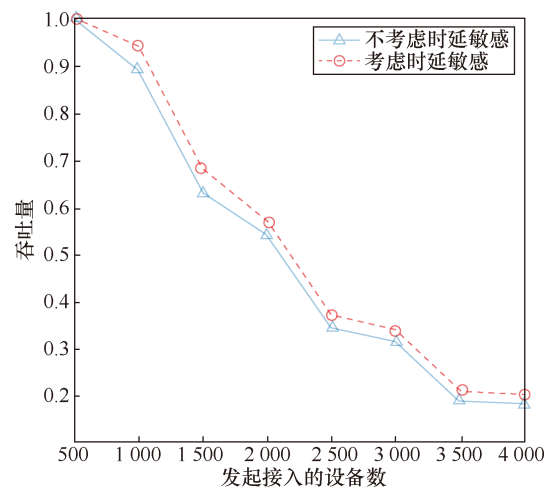


图 3 吞吐量随 MTD 数的变化

随机接入时延随 MTD 的变化如图 4 所示，同样由于发起随机接入的设备数越来越多，产生随机接入冲突的概率越来越大，从而导致 MTD 的接入时延大幅度增加。此时，虽然给时延敏感 MTD 分配了固定的 preamble 资源，但由于本文考虑的时延为所有 MTD 完成随机接入的时延，因此可以看到，考虑时延敏感设备对所有 MTD 完成随机接入的时延影响不大。

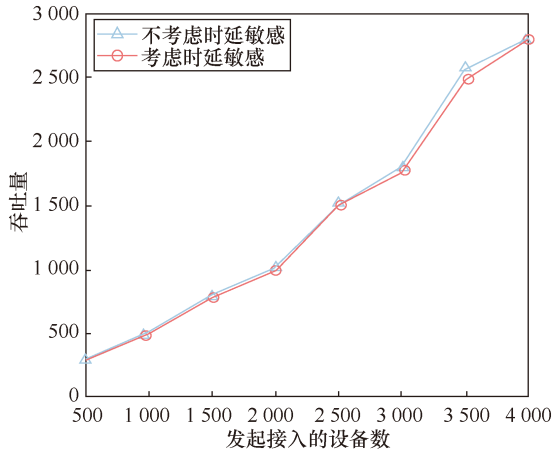


图 4 随机接入时延随 MTD 的变化

不同复用次数下吞吐量的变化如图 5 所示，描述了在 MTD 聚类生成  $k$  个簇即确定的复用次数  $k$  下，同时考虑为时延敏感 MTD 分配特定 preamble 资源，系统的吞吐量随着发起随机接入设备数增加的变化情况。仿真结果表明，按照 MTD 的位置进行聚类分簇后，按照基站配置，不同簇内的 MTD 选择不同的 RO 发起随机接入，实现在时域上的 preamble 复用，从而大大降低了在同一 RO 上发起随机接入的 MTD 总数。根据式(1)在可用 preamble 资源不变的情况下，减少发起接入的设备数，使得随机接入成功的概率大幅度增加，因此随着复用次数  $k$  的增加，系统的吞吐量可以得到有效的提升。

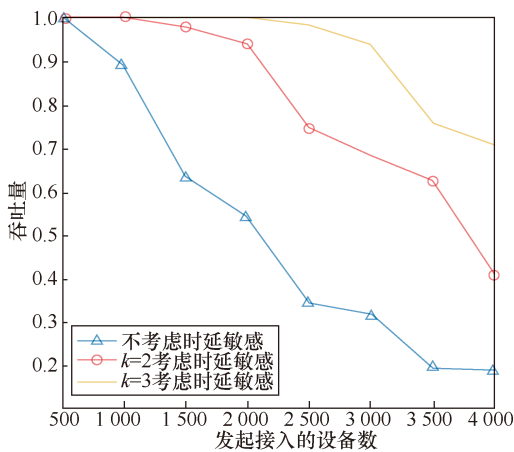


图 5 不同复用次数下吞吐量的变化

不同复用次数下接入时延的变化如图 6 所示，描述了在 MTD 聚类生成  $k$  个簇即确定的复用次数  $k$  下，同时考虑为时延敏感 MTD 分配特定 preamble 资源，所有 MTD 完成随机接入的接入时延随着发起接入的设备总数增加的变化情况。当不考虑 preamble 在时域上的复用时，随着发起随机接入设备数的增加，MTD

随机接入时延逐渐增加，其中在 MTD 数达到 2 000 以上时，接入时延增加更加迅速，这是因为不同 BI 值的选择导致 MTD 平均回避时间更大，从而影响接入时延。随着分配多个可用 RO，实现 preamble 在时域上的复用，从而降低了在一个 RO 上发起接入的 MTD 数，提高了 MTD 的随机接入成功概率，同时 MTD 的 BI 值也会降低，即在不减小接入成功概率的情况下同时减小了回避退让的时间，从而使得所有 MTD 的接入时延大幅降低。

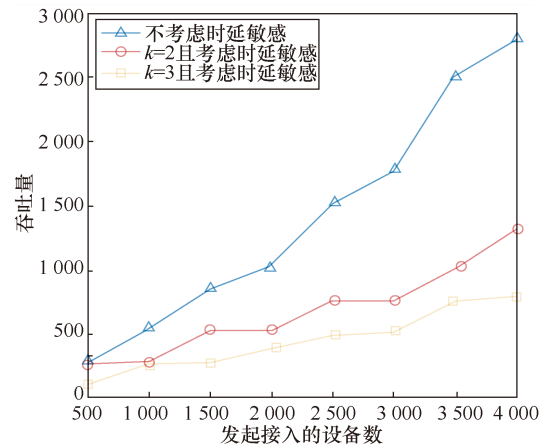


图 6 不同复用次数下接入时延的变化

各种方案下吞吐量随接入设备数量变化如图 7 所示，各种方案下接入时延随接入设备数量变化如图 8 所示。基于 Backoff 指示的方案和基于 ACB 方案只是通过减少在同一时刻发起随机接入的设备数量实现的，并没有从根本上解决随机接入资源短缺的问题。而本文提出的动态接入方案将所有 MTD 按照位置进行聚类形成 2 个簇，实现前导资源在时域上的复用，同时考虑到 MTD 中的时延敏感设备，因此能够持续有效提高系统吞吐量并降低接入时延。

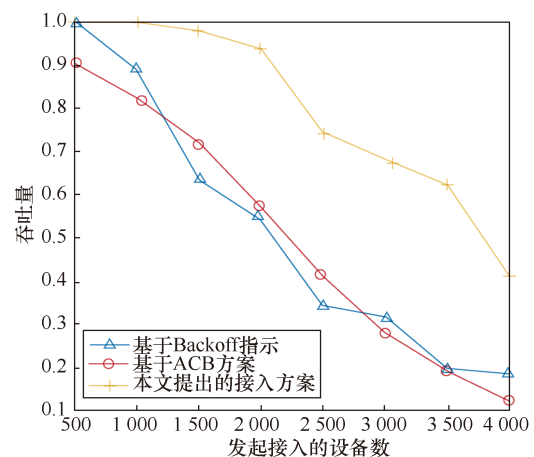


图 7 各种方案下吞吐量随接入设备数量变化

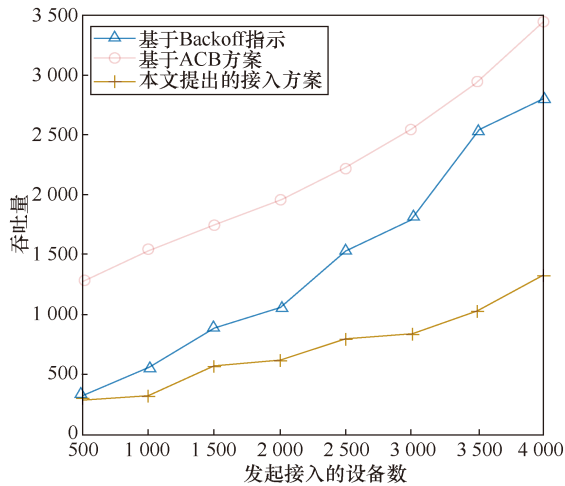


图8 各种方案下接入时延随接入设备数量变化

### 4 结束语

本文针对 M2M 通信中，大规模的 MTD 同时向基站发起随机接入的场景，提出了一种基于上下行子帧和 PRACH 配置的动态 RO 调整，以及针对时延要求高的部分 MTD 分配特定的前导资源的方案。在该方案中，首先，基站根据当前的上下行子帧分配以及当前 PRACH 资源配置计算出复用次数  $k$ ，然后所有 MTD 按照位置进行聚类形成  $k$  个簇，基站为每个簇分配用于随机接入的 RO，每个簇内的 MTD 选择对应的 RO 发起随机接入，基站在其对应的 RO 上接收 preamble，避免了盲检的开销。其次，考虑 MTD 中存在部分少量的时延敏感设备，基站为时延敏感 MTD 预留特定的 preamble 资源，用于时延敏感 MTD 发起随机接入。仿真结果表明，本文提出的方案能够有效地提高 MTD 的接入概率，降低设备的接入时延，同时提高系统的吞吐量。

### 参考文献:

[1] GHAVIMI F, CHEN H H. M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: architectures, service requirements, challenges, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 525-549.

[2] 3GPP. Service requirements for machine-type communications: TS 22.368 V16.0.0[S]. 2020.

[3] DAWY Z, SAAD W, GHOSH A, et al. Toward massive machine type cellular communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 120-128.

[4] U Y W, ZHANG J M, ZHANG Y, et al. Research on access network overload control of mixed service for LTE network[C]//Proceedings of 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 2955-2959.

[5] 3GPP. Study on RAN improvements for machine-type communications: TR 37.868 V11.0.0[R]. 2011.

[6] 孙君, 万聪, 闵宝成, 等. 基于退避预测的 ACB 动态接入新方案[J].

电子学报, 2019, 47(12): 2544-2549.

SUN J, WAN C, MIN B C, et al. Anovel dynamic ACB accessing scheme based on back-off prediction[J]. ActaElectronica Sinica, 2019, 47(12): 2544-2549.

[7] TALEB ALI K, BEN REJEB S, CHOUKAIR Z. A dynamic access control scheme to balance massive access requests of differentiated M2M services in 5G/HetNets[C]//Proceedings of 2017 Sixth International Conference on Communications and Networking (ComNet). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[8] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access(E-UTRA); physical layer procedures: TS 36.213 V16.5.0[S]. 2021.

[9] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access(E-UTRA); medium access control (MAC) protocol specification: TS 36.321 V16.4.0[S]. 2021.

[10] 3GPP. Evolved universal ierrestrial radio access(E-UTRA); physical channels and modulation: TS 36.211 V16.5.0[S]. 2021.

[11] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access(E-UTRA); base station (BS) radio transmission and reception: TS 36.104 V17.1.0[S]. 2021.

[12] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access(E-UTRA); User equipment (UE) radio transmission and reception: TS 36.101 V17.1.0[S]. 2021.

### [作者简介]



景少雄(1998-)，男，西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为5G接入网、无线通信、物联网等。



袁悦(1996-)，女，西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为无线通信、物联网等。



熊家炜(1997-)，男，西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为5G接入网、物联网等。



王军选(1970-)，男，西安邮电大学教授、硕士生导师，主要研究方向为宽带无线通信、物联网等。