

面向差异化 MTC 场景需求的随机接入方案

吴哲夫¹, 杨鑫源¹, 翟文超², 韩会梅¹

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国计量大学信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 针对机器类通信 (MTC) 中大规模机器类通信 (mMTC) 和超可靠低时延通信 (URLLC) 的混合场景下差异化的随机接入需求, 提出了一种面向差异化 MTC 场景需求的随机接入方案。该方案根据设备定时提前 (TA) 信息进行分组: 对于 URLLC 设备, 基站为组内核心设备预留前导码资源并通过非竞争方式接入网络, 进而满足 URLLC 场景的高可靠低时延接入需求; 对于 mMTC 设备, 基站利用不同设备组 TA 信息的差异来区分选择相同前导码设备, 并利用迭代干扰消除 (SIC) 检测设备数据信息, 进而满足 mMTC 场景的海量接入需求。仿真结果表明, 本方案能够显著提升成功接入设备数。

关键词: 机器类通信; 设备分组; 迭代干扰消除; 时间提前量; 海量接入

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020222

Random access scheme for different MTC scenario requirement

WU Zhefu¹, YANG Xinyuan¹, ZHAI Wenchao², HAN Huimei¹

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: For the different random access requirements of the mixed scenarios of ultra-reliable low latency (URLLC) and massive machine type communications (mMTC) in MTC, a random access scheme based on devices grouping was proposed. The proposed scheme divided the MTC devices into several groups based on the timing advance (TA) information: for the URLLC scenario, preamble resources were reserved for core devices in each group, and the URLLC devices accessed the network via the contention-free mechanism, to satisfy the ultra-reliable low latency access requirement; for the mMTC scenario, the base station utilized the different TA information in different group to identify devices selecting the same preamble, and performed successive interference cancellation (SIC) algorithm to detect the data information, to satisfy the massive access requirement. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can significantly increase the number of the successful devices.

Key words: MTC, device grouping, SIC, TA, massive access

1 引言

物联网是新一代移动通信发展趋势, 也是“信息化”时代发展的重要阶段。随着物联网的快速发

展, 预计未来每平方千米将部署 100 万个设备, 用于健康监测、民用运输、智能监控及其他领域。这种场景下需要大量的网络访问连接^[1], 而现有的长期演进 (LTE, long term evolution) 随机接入方案^[2]

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-08-02

通信作者: 韩会梅, hmhan1215@zjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62001419); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY18F010025, No.LY13F010011, No.LQ21F010012); 浙江省教育厅科研基金资助项目 (No.Y201839636)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62001419), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY18F010025, No.LY13F010011, No.LQ21F010012), The Scientific Research Project of Zhejiang Education Department (No.Y201839636)

并不是为处理大量接入请求而设计的，因此可能会导致接入信道严重拥塞。

大规模机器类通信 (mMTC, massive machine type communication) 和超可靠低时延通信 (URLLC, ultra-reliable low latency communication) 是 5G 物联网中 2 个重要的应用场景。第 6 代移动通信系统 (6G, the sixth generation mobile communication system) 将兼容 5G 中的应用场景，并进一步实现这两大场景的增强融合^[3]。mMTC 设备具有高连接密度低功耗、广覆盖、低激活概率、小数据分组传输等特性。与 mMTC 设备不同，URLLC 设备对服务质量要求高，需要满足毫秒级的端到端时延和接近百分之百的数据通信可靠性要求，以便及时对数据进行感知和处理。现有的 LTE 网络随机接入方案主要是针对人与人 (H2H, human-to-human) 通信的业务而设计的，适于单一服务型用户业务。若将其直接应用于 6G 通信中 mMTC 设备和 URLLC 设备的接入，将会产生如下问题：1) 难以适应差异化场景下设备服务质量的需求；2) 由于海量设备接入网络会造成频繁的传输冲突，导致接入的吞吐量降低^[4]。

目前，研究者对 LTE 网络适用于 mMTC 设备和 URLLC 设备的随机接入方案展开了研究。文献[5]提出了基于接入等级限制 (ACB, access class barring) 的随机接入方案。当机器类通信 (MTC, machine type communication) 设备请求接入网络时，将会在 [0,1] 选择一个随机数，仅当这个随机数低于概率因子，设备才能进行随机接入。文献[6]提出了基于扩展 ACB 的随机接入方案，其基本思想是，在网络拥塞的情况下，不允许时延容忍的设备接入网络，而只允许时延要求严格的设备接入网络，进而进一步减少拥塞。文献[7]提出了一种联合资源分配和接入等级限制的随机接入方案，该方案根据可用资源块数量和业务负载自适应地改变 ACB 参数，进而动态分配资源。文献[8]构建了一个博弈论框架，在此框架下，基站先将其随机接入资源分为 3 个子集，分别在人与人通信、机器类型通信和混合通信场景下使用，随后通过纳什均衡策略自适应地分配流量负载来保证系统吞吐量。文献[9]提出了一种前导码重用方案，该方案将小区空间划分为多个区域，并减小接入前导码的循环移位以生成更多的前导码。文献[10]提出了一种事件驱动 M2M (machine to machine) 业务的流量控制随机接入方案，通过统计一段时隙内的随机接入前导码空闲比来估计信道

流量，从而设计控制因子控制接入流量。

上述改善 LTE 接入性能的解决方案主要通过控制接入的设备数或增加可用随机接入资源来提高成功接入的设备数。考虑大多数 mMTC 设备的位置都是固定的，文献[11-13]利用定时提前 (TA, timing advance) 来进一步提高成功接入设备数。其中，文献[11]提出一种基于 TA 值比较的随机接入机制，但是这种机制只单一地使用了 TA 值比较，不能有效地缓解拥塞。文献[12]将 ACB 参数与 TA 信息结合在一起，只有通过 ACB 的 MTC 设备才能随机选择并传输前导码。当具有不同 TA 值的 MTC 设备选择相同的前导码，eNB (evolved node B) 只能随机选择一个 TA 索引。因此，当有 2 个或多个 MTC 设备选择与 eNB 所选 TA 索引相对应的相同前导码时，冲突仍然存在。为缓解这种接入冲突，文献[13]提出一种基于缓解冲突的 TA 选择的随机接入方案。该方案提出了一种特殊的前导码放置方法，以使 eNB 能够估计出具有不同 TA 索引的竞争者的数量，并根据估计的结果选择合适 TA 的值。文献[14]提出了一种基于迭代干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 的非正交随机接入方案。该方案利用 MTC 设备的空间分布到达时间的差异来识别具有相同前导码的多个 MTC 设备，并允许多个设备使用相同的资源块进行数据消息传输，因此，该方案可以有效地增加成功接入的设备数，缓解接入拥塞问题。尽管上述接入的方案都能提供可靠的通信，但都仅考虑了 mMTC 或 URLLC 场景的设备的接入。现有文献中，仅有文献[15]给出了 2 种场景下的设备同时接入网络的随机接入方案，该方案预先将小区中 URLLC 场景的设备分组，并通过指定的组长使用预留前导码进行接入，保证了 URLLC 场景的设备接入成功；但是，mMTC 场景的设备仍采用传统正交接入机制，无法满足海量的接入请求，这将不可避免地导致网络接入的拥塞和过载。

针对以上问题，本文提出了一种面向差异化 MTC 场景需求的随机接入方案。该方案根据 TA 信息对 MTC 设备进行分组：对于 URLLC 设备，基站为组内的核心设备预留前导码，并通过非竞争方式接入网络；对于 mMTC 设备，根据不同组 TA 信息的差异来识别选择相同前导码的多个设备，并允许设备在相同的数据资源上传输数据信息，eNB 利用 SIC 算法恢复设备数据信息。本文方案在为 URLLC 场景的设备提供高可靠性和低时延接入的

同时满足 mMTC 场景的巨连接要求，避免了网络拥塞，大幅度提高了系统的成功接入设备数。

2 系统模型

考虑一个半径为 d_c 的小区，基站位于小区中心， M 个 MTC 设备分布在小区中，其中包含 βM ($0 \leq \beta \leq 1$) 个 URLLC 设备和 $(1-\beta)M$ 个 mMTC 设备，具体系统模型如图 1 所示。

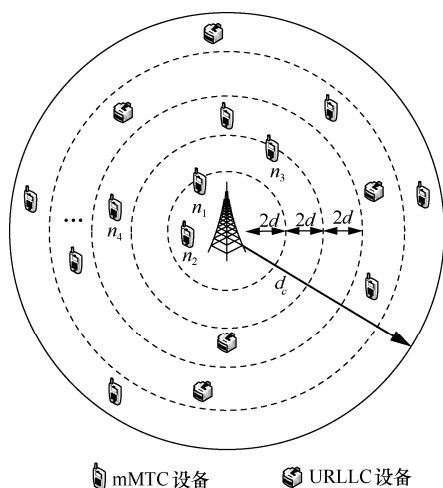


图 1 系统模型

为了降低前导码碰撞概率，提升接入设备数，将小区内的 MTC 设备按 TA 信息的不同进行分组，具体为采用量化间隔为 $16T_s$ 对小区内所有设备的传播时延进行量化，得到所有设备的 TA 索引 $\Omega = [TI_1, TI_2, \dots, TI_M]$ ，同时采用量化距离 $d = 16T_s c$ 对小区半径进行量化，得到 ζ 个环形空间，其中， T_s 表示 LTE 系统的最小时间单位， TI_M 表示第 M 个设备的 TA 索引， c 表示光速。小区内的环形数为 $\zeta = \lceil \frac{d_c}{2d} \rceil$ ，其中， $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整函数。进一步地，将同一环形区域内的所有设备作为一个设备组，具有相同的 TA 索引；不同环形区域内的设备为不同的设备组，具有不同的 TA 索引。每个设备组根据组内的设备服务类型，进一步划分为 URLLC 设备组和 mMTC 设备组。用 S_i 表示第 i ($i = 1, 2, \dots, \zeta$) 个环，其中的设备组对应的 TA 索引记为 $T_{A,i}$ 。例如，在图 1 中， n_1, n_2, n_3, n_4 为小区中的 4 个 mMTC 设备， n_1, n_2 位于同一个环 S_1 中，具有相同的 TA 索引，属于同一 mMTC 设备组； n_3, n_4 分别位于环 S_2, S_3 中，具有不同的 TA 索引，属于不同 mMTC 设备组。

3 随机接入方案

3.1 差异化 MTC 场景需求的接入方案

考虑 URLLC 设备的高可靠低时延需求，本文方案中的 URLLC 设备采用非竞争的随机接入机制。每一个 URLLC 设备组都有一个在处理能力和电池寿命方面更加强化的 URLLC 设备作为核心设备，同一组的所有 URLLC 设备都能与核心设备通信^[15]；考虑前导码数和 mMTC 设备数的严重不匹配，mMTC 设备采用基于竞争的机制接入网络，如图 2 所示，具体步骤如下。

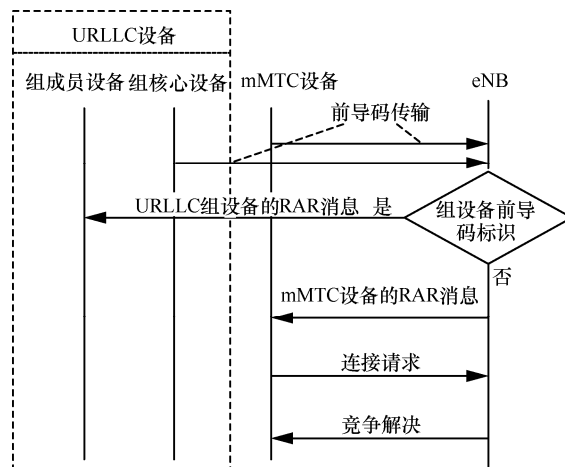


图 2 面向差异化 MTC 场景需求的随机接入方案

步骤 1 前导码传输

URLLC 设备组中的核心设备将基站为组预留的前导码发送至基站。mMTC 设备从 $R-NG$ 个前导码中随机选择一个前导码发送至基站，其中， R 表示一个时隙中可用的前导码总数， NG 表示系统内为 URLLC 组设备预留的前导码数，即划分的 URLLC 设备的组数。为了缓解前导码冲突，对 mMTC 设备使用文献[13]中提出的前导码放置方法，具体如下。位于第 i 个环的 mMTC 设备组中的设备采用第 $\lfloor \frac{26-\zeta}{2+i} \rfloor$ 个子载波作为放置其选定前导码的起始位置，使基站能够估计每个 mMTC 设备组中竞争同一前导码的设备数量。令 $\rho_{r,i}$ 表示第 i 个 mMTC 设备组中的 mMTC 设备发送的第 r 个前导码序列，接收到的前导码信号 Y 可表示为

$$Y = \sum_{r=1}^{R-NG} \sum_{i=1}^{\zeta} b(r,i) \rho_{r,i} + N \quad (1)$$

其中， ζ 表示环总数， $b(r,i)$ 表示第 i 个 mMTC 设

备组中选择第 r 个前导码的设备数, N 表示均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。

步骤 2 前导码的检测和随机接入响应 (RAR, random access response) 传输

eNB 首先检测接收到的前导码。若检测的前导码是为 URLLC 设备组保留的前导码, 基站根据前导码与 URLLC 设备组一一对应的关系, 识别此前导码所对应的 URLLC 设备组, 并进一步检索已注册组员的有关设备信息, 然后为每个组员的设备分配资源块。否则, 基站通过计算接收序列与特定的前导码序列的互相关值, 得到在第 i 个 mMTC 设备组中选择第 r 个前导码的设备数 $b(r, i)$, 其估计方法如算法 1 所示。若 $b(r, i)$ 的值为 1, 基站生成 RAR 消息。每个 RAR 消息都包含前导码标识、TA 索引、上行数据传输资源、功率等级选取指示。

算法 1 $b(r, i)$ 的估计算法

输入 mMTC 设备前导码数为 $R - NG$; N_{ZC} 为 ZC (Zadoff-Chu) 序列的长度; 小区内的环形数为 ζ ; 初始化 $b(r, i) = 0$;

输出 $b(r, i)$

1) for $r=1:1: R - NG$

2) for $i=1:1:\zeta$

3) if $\left| \sum_{l=0}^{N_{ZC}-1} Y \rho_{r,i} \right| > \kappa$ then

4) $b(r, i)++$

5) 前导码的信号 $Y = Y - \rho_{r,i}$

6) end if

7) end for

8) end for

步骤 3 数据信息的传输

每个 URLLC 设备在其所分配的资源块上传输数据信息。由于 mMTC 设备的位置固定, 每个 mMTC 设备在接入之前可以根据现有的一些测距技术知道自身与基站的距离, 从而可以计算出所属分组和 TA 索引。在其接收到 RAR 消息后, 首先比较前导码标识, 确认与步骤 1 传输的前导码是否相匹配。如果匹配, 则读取功率等级指示并从 L 个功率等级中随机选取一个功率等级, 其中, L 表示基站分配的功率等级总数。然后进一步比较 RAR 消息中的 TA 信息是否与自身 TA 信息相等, 如果相等, 则成功解码 RAR 消息, 并在相应 RAR 消息中所给定的数据传输资源上传输数据信息; 否则, 设

备从分配给该设备所选择的前导码的数据传输资源中随机选择一个数据传输资源传输数据信息。

步骤 4 竞争解决

由于每个 URLLC 设备组都有预留的前导码资源, 确保了每个组的接入过程不会发生冲突。此外, 基站能够根据在初始附加过程中分配的地址为组中的成员设备分配资源块, 保证了每个组员的设备的数据信息传输的成功, 因此 URLLC 设备不需要竞争解决过程。

对于 mMTC 设备, 当多个 mMTC 设备使用相同的数据传输资源发送数据信息时, 基站根据接收功率的不同, 采用 SIC 算法检测各设备的数据信息。首先检测最高接收功率等级设备的数据信息。若能成功检测, 则将此设备的数据信息进行干扰消除, 进而检测次高功率等级设备的数据信息, 直到无法成功检测设备的数据信息。需要说明的是, 若在同一资源块上选取第 l 个功率等级的设备数为 1, 且已成功检测第 $1 \sim l-1$ 个功率等级设备的数据信息, 则能够成功检测此设备的数据信息。否则, 基站无法正确检测此资源块其余设备的数据信息, 设备接入失败。

3.2 URLLC 设备的分组原则

在本文方案中, URLLC 设备的分组是预先配置的, 其分组情况影响着整个方案的接入性能。具体来说, 基于分组的非竞争接入机制满足了 URLLC 设备高可靠低时延需求, 减少了竞争接入的设备数, 但同时也减少了 mMTC 设备可用的前导码数, 这可能导致 mMTC 设备冲突加剧, 接入性能下降。因此, 需要确定 URLLC 设备的分组原则以提高方案的接入性能。一般来说, 每个前导码的设备数可以用来指示不同设备选择相同前导码而导致冲突的可能性。当所有设备不进行分组, 都采用竞争接入机制时, 每个前导码的设备数可表示为 $\frac{M}{R}$ 。在本文方案中, 每个前导码的 mMTC 设备数可表示为 $\frac{(1-\beta)M}{R-NG}$ 。为保证划分 URLLC 设备组有利于提高 mMTC 设备的接入性能水平, 需满足式(2)所示条件。

$$\frac{(1-\beta)M}{R-NG} < \frac{M}{R} \quad (2)$$

式(2)可进一步简化为 $NG < \beta R$, 即 URLLC 设备的分组原则。式(2)的推导详见附录 1。

如第 2 节所述, 本文方案中 URLLC 设备是按

TA 信息的不同进行分组的, 具有相同 TA 索引的 URLLC 设备分为一组, 可划分的最大组数为 ζ 。

就实际应用场景而言, 对于小型小区, 由于小区半径较小, 按该分组方式可划分的组数也较少, 因此在此场景下使用该分组方式能很大程度地满足分组原则; 而对于大型小区, 较大的小区半径可能导致 URLLC 设备的分组数增多, 但同时区域内覆盖的 URLLC 设备数也更多, 即 β 更大。此外, 由于系统内 URLLC 设备的分组是预先配置的, 因此可在设备初始部署时, 通过增加部署的设备数或调整设备部署的位置使该分组方式满足分组原则。

4 性能分析

成功接入设备数是衡量随机接入方案的一个重要指标。在本文方案中, 成功接入设备数 Z 为 URLLC 场景成功接入设备数 Z_G 与 mMTC 场景成功接入设备数 Z_{NG} 之和, 如式(3)所示。

$$Z = Z_{NG} + Z_G \quad (3)$$

下面将给出 Z_G 和 Z_{NG} 的计算过程。

URLLC 设备采用的是无竞争的随机接入, 因此, URLLC 场景的成功接入设备数为

$$Z_G = \gamma U, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

其中, U 表示小区活跃的设备总数, γ 表示当前活跃的设备数占比。

mMTC 设备采用基于竞争的非正交接入机制。若基站能够成功检测 mMTC 设备数据信息, 则该设备可成功接入网络。成功接入 mMTC 设备数为

$$Z_{NG} = R_{NG} \left(P(Y_r^1) + \sum_{n=2}^m \sum_{k=1}^n \text{PM}_n^k k P(Y_r^n) \right) \quad (5)$$

其中, R_{NG} 表示可供 mMTC 设备使用的前导码的总数; $m = (1 - \gamma)U$ 表示小区内活跃 mMTC 的设备

数; $P(Y_r^n) = C_m^n \left(\frac{1}{R_{NG}} \right)^n \left(1 - \frac{1}{R_{NG}} \right)^{m-n}$ 表示有 n 个设备选取第 r 个前导码的概率; PM_n^k 表示在 n 个设备选取第 r 个前导码的条件下, 成功接入 k 个设备的概率。

由文献[13]可知, 当选取同一前导码设备数 $n \geq 4$ 时, $P(Y_r^n) < 0.013$ 。文献[13]提出的非正交接入方案只考虑 2 个设备选择相同前导码的场景, 而本文方案将推导 1~4 个 mMTC 设备选择相同前导码的情形。此时, Z_{NG} 可近似计算为

$$Z_{NG} \approx R_{NG} \left(P(Y_r^1) + \sum_{n=2}^4 \sum_{k=1}^n \text{PM}_n^k k P(Y_r^n) \right) \quad (6)$$

为求解式(6), 需计算出 PM_n^k ($n=2,3,4$), 可通过如下步骤求得。

用 $p_{n,u}^k$ 表示 n 个设备选择相同前导码序列并在 u ($0 \leq u \leq n$) 个资源块成功接入 k ($0 \leq k \leq n$) 个设备的概率, p_n^u 表示 n 个设备选择相同前导码序列条件下获得 u 个资源块的概率, 即 n 个设备中能够成功识别 u 个设备 TA 信息的概率。则 PM_n^k 的计算式为

$$\text{PM}_n^k = \sum_{u=1}^n p_{n,u}^k p_n^u \quad (7)$$

下面依次给出 p_n^u 和 $p_{n,u}^k$ 的计算过程。

① p_n^u 的计算

假设 mMTC 设备均匀分布在小区中, d_j 表示 eNB 与第 j 个 mMTC 设备的距离, 且遵循式(8)所示分布。

$$f_{d_j}(x) = \frac{2x}{d_c^2}, \quad 0 < x < d_c \quad (8)$$

其中, d_c 为小区半径。由式(8)可以计算出第 j 个 mMTC 设备位于第 i 个环形区域的概率为

$$P_i = \begin{cases} \int_{2d^{(i-1)}}^{2di} \frac{2x}{d_c^2} dx = \frac{4d^2(2i-1)}{d_c^2}, & i=1,2,\dots,\zeta-1 \\ \int_{2d^{(i-1)}}^{d_c} \frac{2x}{d_c^2} dx = 1 - \frac{(i-1)^2(4d^2)}{d_c^2}, & i=\zeta \end{cases} \quad (9)$$

显然, 在选择相同前导码的 n 个设备中, 如果有 $u = n-1$ 个设备的 TA 信息与其他设备的 TA 信息互不冲突, 则基站能识别 n 个设备的 TA 信息, 分配 n 个资源块, 即 $p_n^{n-1} = 0$ 。则在选择相同前导码的 n ($n=2,3,4$) 个设备中, 只能分配一个资源块的概率为

$$p_n^1 = \begin{cases} 0, & n=2 \\ \sum_{i=1}^{\zeta} \sum_{q=1, q \neq i}^{\zeta} n(P_i)^{n-1} P_q, & n=3,4 \end{cases} \quad (10)$$

在选择相同前导码的 n ($n=2,3,4$) 个设备中, 只能分配 2 个资源块的概率为

$$p_n^2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\zeta-1} \sum_{q=i+1}^{\zeta} n(n-1)P_i P_q, & n=2 \\ 0, & n=3 \\ \sum_{i=1}^{\zeta} \sum_{q=1}^{\zeta-1} \sum_{\substack{t=q+1 \\ q \neq i, t \neq i}}^{\zeta} n(n-1)P_i^{(n-2)} P_q P_t, & n=4 \end{cases} \quad (11)$$

在选择相同前导码的 $n(n=2,3,4)$ 个设备中, 只能分配 3 个资源块的概率为

$$p_n^3 = \begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^{\zeta} P_i^n - \sum_{u=1}^{n-1} P_n^u, & n=3 \\ 0, & n=4 \end{cases} \quad (12)$$

在选择相同前导码的 $n(n=2,3,4)$ 个设备中, 只能分配 4 个资源块的概率为

$$p_n^4 = 1 - \sum_{i=1}^{\zeta} P_i^n - \sum_{q=1}^{\zeta-1} \sum_{t=q+1}^{\zeta} \frac{n(n-1)}{2} (P_q P_t)^2 - \sum_{u=1}^{n-1} P_n^u, n=4 \quad (13)$$

② $p_{n,u}^k$ 的计算

有 2 个设备同时向 eNB 发送相同前导码序列, 并在 u 个资源块上成功接入 k 个设备的概率为

$$p_{2,u}^k = \begin{cases} 0, & k=1 \\ \frac{(uL)(uL-1)}{(uL)^2}, & k=2 \end{cases} \quad (14)$$

有 3 个设备同时向 eNB 发送相同前导码序列, 并在 u 个资源块上成功接入 k 个设备的概率为

$$p_{3,u}^k = \begin{cases} \frac{(uL)(uL-1) - u \sum_{g=1}^{L-1} (L-g)}{(uL)^3}, & k=1 \\ 0, & k=2 \\ \frac{(uL)(uL-1)(uL-2)}{(uL)^3}, & k=3 \end{cases} \quad (15)$$

有 4 个设备同时向 eNB 发送相同前导码序列, 并在 u 个资源块上成功接入 k 个设备的概率为

$$p_{4,u}^k = \begin{cases} \frac{4(uL)(uL-1) - 4u \sum_{h=1}^{L-1} (L-h) + 12u \sum_{v=1}^{L-1} (L-v)(uL-L+v-1)}{(uL)^4}, & k=1 \\ \frac{6u \sum_{w=0}^{L-1} (uL-L+w)(uL-L+w-1)}{(uL)^4}, & k=2 \\ 0, & k=3 \\ \frac{(uL)(uL-1)(uL-2)(uL-3)}{(uL)^4}, & k=4 \end{cases} \quad (16)$$

将 p_n^u 与 $p_{n,u}^k$ 代入式(7)中可求出相应的 PM_n^k , 进一步将 PM_n^k 代入式(6), 计算出 mMTC 场景下成功接入的设备数为

$$Z_{NG} \approx m \left(1 + \frac{(m-1)}{R_{NG}-1} PM_2^2 + \frac{(m-1)(m-2)}{6(R_{NG}-1)^2} (PM_3^1 + 3PM_3^3) + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{24(R_{NG}-1)^3} (PM_4^1 + 2PM_4^2 + 4PM_4^4) \right) \left(1 - \frac{1}{R_{NG}} \right)^{m-1} \quad (17)$$

将式(4)和式(17)代入式(3), 可得本文方案的成功接入的设备数为

$$Z \approx m \left(1 + \frac{(m-1)}{R_{NG}-1} PM_2^2 + \frac{(m-1)(m-2)}{6(R_{NG}-1)^2} (PM_3^1 + 3PM_3^3) + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{24(R_{NG}-1)^3} (PM_4^1 + 2PM_4^2 + 4PM_4^4) \right) \left(1 - \frac{1}{R_{NG}} \right)^{m-1} + \gamma U \quad (18)$$

5 仿真分析

本文方案与文献[15]的随机接入方案和传统的随机接入方案^[2]的成功接入设备数进行了比较, 并研究了当预留的前导码数变化时对方案中设备接入性能的影响。

仿真中, mMTC 设备均匀分布在小区中, 划分的 mMTC 设备组数为 ζ , 每个 mMTC 设备组的平均设备数为 $(1-\beta)MP_i$, 其中 P_i 为 mMTC 设备位于第 i 个设备组的概率; URLLC 设备基于特定场景部署在小区中。小区半径 $d_c = 700$ m, 取量化单位为 $2d = 16T_s c = 156$ m, 其中 $T_s = 3.072 \times 10^{-7}$ s 为 LTE 基本时间单位^[16], $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速, 一个时隙中可用的前导码数 $R=64$ 。MTC 设备的成功接入概率为 $PS = \frac{Z}{U}$, mMTC 设备的成功接入概率为

$$PC = \frac{Z_{NG}}{m}$$

图 3 为成功接入设备数随小区内活跃设备数的变化曲线。假设按照设备的 TA 信息所划分的 URLLC 设备组数为 5, 即 URLLC 设备组预留的前导码数 $NG=5$ 。由图 3 可知, 传统随机接入方案中的成功接入设备数随着活跃设备数的增加先增大后减小。而本文方案与文献[15]的随机接入方案的成功接入设备数随活跃设备数的增加呈先增长后逐渐趋于平稳的趋势, 与未分组的传统随机方案相比, 这 2 种方案都具有较高的接入吞吐量。同时, 由于本文方案是利用设备的 TA 的信息来实现前导码的检测和 RAR 接收, 且允许在一个资源块上同时发送多个设备的消息, 因此本文方案能很大程度

地提高成功接入的设备数，且远高于文献[15]中成功接入的设备数。图3中给出的仿真分析结果与理论分析值一致，验证了文中理论分析结果的有效性。另一方面可以观察到，在本文方案中，随着功率等级的增加，成功接入的设备数也随之增长，这是由于基站在同一资源块上可以基于更多不同等级的功率成功检测更多设备的数据信息。

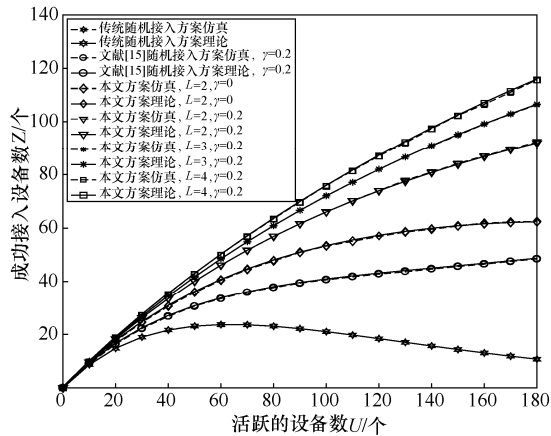


图3 成功接入的设备数随MTC设备数的变化曲线

图4为在不同小区半径下，成功接入设备数随前导码数的变化曲线。其中基站分配的功率等级总数 $L=3$ ，小区内活跃设备数 $U=80$ ，假设在不同半径下，小区内URLLC设备的分布情况一致，即按照其TA信息所划分的URLLC设备组数 NG 都为5。

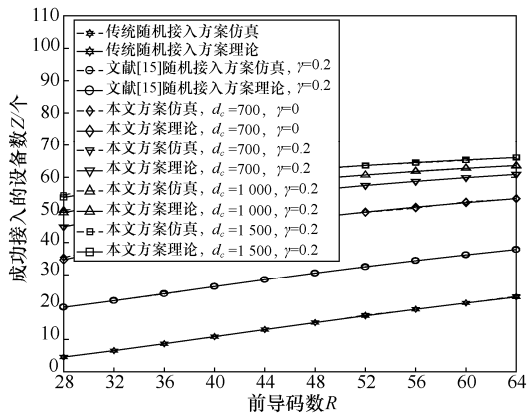


图4 成功接入的设备数随系统内前导码数的变化曲线

由图4可知，可用的前导码越少，系统接入吞吐量就越低。而且本文方案的成功接入设备数远高于文献[15]的随机接入方案和传统随机接入方案的成功接入设备数。同时，随着前导码的增加，冲突概率逐渐降低，成功接入的设备数随之

增加。图4中给出的仿真分析结果与理论分析值一致，验证了文中理论分析结果的有效性。此外，由于mMTC设备均匀分布在小区中，当小区内的设备数一定时，随着小区半径的增大，接入同一前导码的多个设备的TA信息的冲突概率也随之降低，从而提高了成功接入设备数。

图5与图6分别给出了在不同的预留前导码数下，mMTC设备与MTC设备成功接入概率随小区内活跃设备数的关系。其中，基站分配功率等级数 $L=3$ ，图中 $NG=0, \gamma=0$ 指的是在此场景下不划分URLLC设备组，URLLC设备与mMTC设备都采用本文方案中的非正交接入机制接入网络。从图5与图6中可以看出，随着活跃设备数的增加，设备成功接入率下降。由于前导码资源有限，设备数的增多导致mMTC设备接入冲突加剧，设备的成功接入率下降。

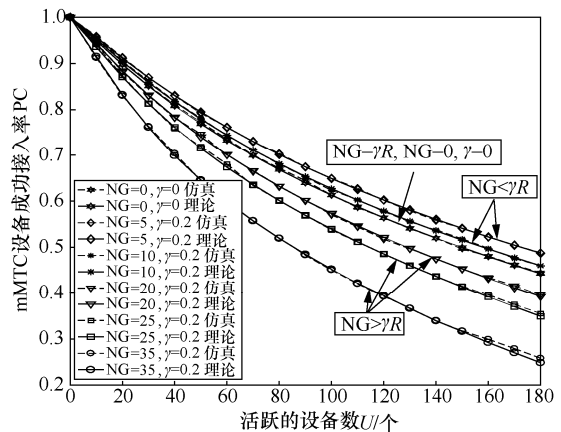


图5 mMTC设备的成功接入率随MTC设备数的变化曲线

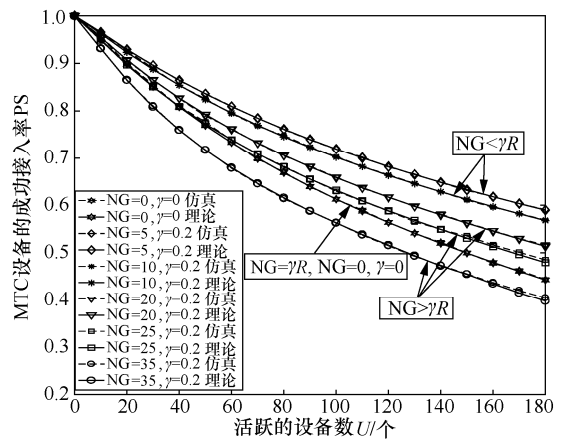


图6 MTC设备的成功接入率随MTC设备数的变化曲线

对比图5与图6可知，当活跃的URLLC设备数一定时，随着预留前导码数 NG ($NG \neq 0$)增加，设

备的成功接入率下降。仿真结果说明, 过多地划分 URLLC 设备组, 会降低 mMTC 设备的接入性能, 进而影响整个方案中设备的接入性能。因此, 需要使用合适的分组方式划分 URLLC 设备。进一步地, 从图 5 中可观察到, 与 $NG = 0$ 场景下的 mMTC 设备相比, $NG < \gamma R (NG \neq 0)$ 场景下的 mMTC 设备具有更高的成功接入率, 而 $NG > \gamma R$ 场景下的 mMTC 设备成功接入率更低。仿真结果表明, 当划分的 URLLC 设备组数满足 $NG < \gamma R (NG \neq 0)$ 时, 可提高 mMTC 设备的接入性能; 当 URLLC 设备组数 $NG > \gamma R$ 时, 会造成 mMTC 设备接入性能下降, 且 NG 越大, 设备的成功接入率越低。从图 6 中可观察到, 在 $NG = 35$ 、 $\gamma = 0.2$ 场景下的 MTC 设备成功接入率低于 $NG = 0$ 场景下设备的成功接入率。这一方面是由于系统内划分的 URLLC 设备组数过多, 导致 $NG > \gamma R$, 降低了 mMTC 设备的接入性能; 另一方面是由于当前成功接入的 URLLC 设备数过少, 不足以弥补 mMTC 设备接入性能下降所减少的成功接入设备数。仿真结果强调了遵循式(2)中给出的分组原则的重要性。此外, 在当前仿真场景中小区内 URLLC 设备按照 TA 信息的不同进行分组, 所能划分的最大组数为 $\zeta = 5 < \gamma R$, 这进一步说明了使用本文方案中的分组方式能很大程度地满足 URLLC 设备的分组原则。

6 结束语

本文针对具有不同服务要求的 MTC 设备随机接入问题, 提出了一种面向差异化 MTC 场景需求的随机接入方案。该方案根据设备的服务质量要求和 TA 信息将设备分为 URLLC 设备组和 mMTC 设备组, 一方面对 URLLC 设备基于其所在组进行两步接入, 即由每一组的核心设备使用预留的前导码与 eNB 进行通信, 这种无竞争的接入保证了 URLLC 设备接入可靠性, 降低了接入时延; 另一方面为缓解 mMTC 设备大规模接入的拥塞问题, 对 mMTC 设备基于其所在组的 TA 信息进行非正交接入, 提高成功接入设备数。理论分析和仿真实验结果验证了本文方案的有效性。

附录 1 URLLC 设备的分组原则推导

如第 2 节所述, 小区内 MTC 设备数为 M , URLLC 设备数占比为 β , 假设接入的时隙总数为 I_r , 第 s 个时隙内

活跃的 MTC 设备数为 U_s , 活跃的 URLLC 设备数占比为 γ_s 。在第 $1 \sim I_r$ 时隙内, 需要满足的分组原则可表示为

$$\begin{aligned} \frac{(1-\gamma_{I_r})U_{I_r}}{R-NG} &< \frac{U_{I_r}}{R} \\ \frac{(1-\gamma_{I_r-1})U_{I_r-1}}{R-NG} &< \frac{U_{I_r-1}}{R} \\ &\vdots \\ \frac{(1-\gamma_1)U_1}{R-NG} &< \frac{U_1}{R} \end{aligned} \quad (19)$$

对式(19)进一步推导可得

$$\sum_{s=1}^{I_r} \frac{(1-\gamma_s)U_s}{R-NG} < \sum_{s=1}^{I_r} \frac{U_s}{R} \quad (20)$$

每个时隙内活跃的 MTC 设备由新到达的设备和随机退避后再次接入的设备两部分组成。假设系统内前导码检测概率为 100%^[17], 由于之前时隙接入失败, 而执行随机退避后在第 s 个时隙再次接入的 mMTC 设备数为 mf_s , 式(20)可进一步表示为

$$\frac{m + \sum_{s=1}^{I_r} mf_s}{R-NG} < \frac{M + \sum_{s=1}^{I_r} mf_s}{R} \quad (21)$$

其中, $m = (1-\beta)M$ 为小区内 mMTC 设备数。由于本文方案中的 mMTC 设备采用基于 TA 信息的非正交接入机制, 可显著提高单个时隙内成功接入的设备数, 有效地保证了 $\sum_{s=1}^{I_r} mf_s \ll M$, 因此式(21)可进一步化简为

$$\frac{m}{R-NG} < \frac{M}{R} + \frac{\sum_{s=1}^{I_r} mf_s}{R} - \frac{\sum_{s=1}^{I_r} mf_s}{R-NG} \approx \frac{M}{R} \quad (22)$$

推导完毕。

参考文献:

- [1] ALI M S, HOSSAIN E, KIM D I. LTE/LTE-A random access for massive machine-type communications in smart cities[J]. IEEE Communication Magazine, 2017, 55(1): 76-83.
- [2] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (e-UTRA) : TS 36.321 V9.4.0[S]. 3GPP, 2011.
- [3] 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.
- [4] XIA N, CHEN H-H, YANG C S. Radio resource management in machine-to-machine communications-a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 791-828.
- [5] 3GPP. Study on RAN improvements for machine-type communications: TR 37.868 V11.0.0 [S]. 3GPP, 2011.
- [6] LIN T M, LEE C H, CHENG J P, et al. PRADA: prioritized random access with dynamic access barring for MTC in 3GPP LTE-A net-

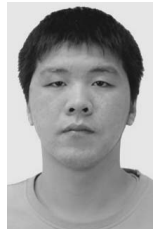
- works[J]. IEEE Transactions, 2014, 63(5): 2467-2472.
- [7] WIRIAATMADJA D T, CHOI K W. Hybrid random access and data transmission protocol for machine-to-machine communications in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 33-46.
- [8] PANG Y C, CHAO S L, LIN G Y, et al. Network access for M2M/H2H hybrid systems: a game theoretic approach [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(5): 845-848.
- [9] THOMSEN H, PRATAS N K, STEFANOVIC C, et al. Code-expanded radio access protocol for machine-to-machine communications [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013, 24(4):355-365.
- [10] 杨柳, 范平志, 郝莉. LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议[J]. 通信学报, 2014, 35(12): 53-61.
YANG L, FAN P Z, HAO L. Flow control random access protocol for event-driven machine-to-machine traffics in LTE network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(12): 53-61.
- [11] KO K S, KIM M J, BAE K Y, et al. A novel random access for fixed-location machine-to-machine communications in OFDMA based systems[J]. IEEE Communications, 2012, 16(9): 1428-1431.
- [12] WANG Z, WONG V W S. Joint access class barring and timing advance model for machine-type communications[C]// 2014 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2357-2362.
- [13] ZHANG M Y, LI Y, GUO X D. A novel random access scheme for stationary machine-type communication devices[J]. IET Communications, 2018, 12(9): 2448-2453.
- [14] LIANG Y N, LI X, ZHANG J Y, et al. Non-orthogonal random access for 5G networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(7): 1.
- [15] WEERASINGHE T N, BAIAPUWADUGE I A M, LI F Y. Preamble reservation based access for grouped mMTC devices with URLLC requirements[C]//2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] LIEN S Y, LIAU T H, KAO C Y, et al. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 27-32.

- [17] DAWY Z, SAAD W ,GHOSH A , et al. Toward massive machine type cellular communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 24(1): 120-128.

[作者简介]



吴哲夫 (1971-)，男，浙江金华人，博士，浙江工业大学副教授，主要研究方向为数据通信网络、无线感知、智能无线应用等。



杨鑫源 (1994-)，男，河南信阳人，浙江工业大学硕士生，主要研究方向为随机接入。



翟文超 (1988-)，男，河南驻马店人，博士，中国计量大学讲师，主要研究方向为载波同步、索引调制、智能曲面、随机接入等。



韩会梅 (1990-)，女，山东济宁人，博士，浙江工业大学讲师，主要研究方向为机器学习、随机接入、大规模 MIMO、智能曲面等。