一种基于 Beta 分布的 NB-IoT 接入方案

李梦雅，李正权
（江南大学物联网工程学院，江苏 无锡 214122）

摘　要：作为低功率广域物联网新兴技术之一，窄带物联网（NB-IoT, narrow band Internet of things）面临着终端海量连接的压力和挑战。针对实际应用场景，提出一种 Beta 分布下的前导码分配方案，该方案首先计算各时隙设备能耗度，并按照平均能耗度和累计能耗度两种分组方式将设备划分为高能耗度设备组和低能耗度设备组，然后优先将前导码分配给高能耗度设备组，剩余前导码和高能耗度设备组冲突前导码分配给低能耗度设备组。仿真结果表明，与传统随机分配方案相比，所提方案能够有效提高 NB-IoT 系统平均接入成功率和平均吞吐量，同时能有效降低退避时间。

关键词：NB-IoT；前导码；能耗度；接入成功率；平均吞吐量
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
doi:10.11959/j.issn.2096−3750.2021.00216

A NB-IoT access scheme based on Beta distribution

LI Mengya, LI Zhengquan
School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: As one of the emerging technologies of low-power wide-area Internet of things, narrow band Internet of things (NB-IoT) faces the pressure and challenge of massive connections of terminals. Aiming at practical application scenarios, a preamble allocation scheme based on Beta distribution was proposed. In this scheme, the energy consumption of each time slot device was firstly calculated. The equipment was divided into high energy consumption according to two grouping methods: average energy consumption and cumulative energy consumption. The preamble was assigned to the high-energy-consuming device group first, and the remaining preamble and the conflicting preamble of the high-energy-consuming device group were assigned to the low-energy-consuming device group. The simulation results show that compared with the traditional random allocation scheme, the proposed scheme can effectively improve the average access success rate and average throughput of the NB-IoT system, and can effectively reduce the back off time.

Key words: NB-IoT, preamble, energy consumption, access success rate, average throughput

1　引言

NB-IoT 是机器类通信的一种，具有低功耗、电池寿命长、远距离深度覆盖等特点，能够支持海量设备接入，广泛应用于设备能耗低、主要收发小数据包的物联网场景，是低功率广域业务中最具发展潜力的方向之一。截止至 2020 年 2 月，国内三大运营商 NB-IoT 连接数已突破 1 亿。在 2020 年 7 月的国际电信联盟无线电通信部门 5D 工作组（ITU-RWP5D, International Telecommunication Un-

收稿日期：2020−11−24；**修回日期：**2020−12−28
通信作者：李正权，lzq722@jiangnan.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.61571108）；无锡市科技发展资金项目（No.H20191001，No.G20192010）；江苏省研究生科研与实践创新计划项目（No.SJCX20_0781）
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571108), The Wuxi Science and Technology Development Fund (No.H20191001, No.G20192010), The Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.SJCX20_0781)

ion-radio communication sector working party 5D）会议上，国际电信联盟通过将 NB-IoT 正式纳为 5G 标准的决议。伴随物联网业务的快速发展及 5G 更广阔市场的到来，2G/3G 迁移转网[1]，意味着 NB-IoT 将承接大部分原 2G/3G 减频退网后的连接，支持海量设备接入，持续服务于各行业。

NB-IoT 的大容量特性意味着其单小区承载设备密度较大，在信道带宽仅为 180 kHz 且不支持码分复用的情况下，如果大量设备同时被唤醒并触发接入，将因为信道资源有限而无法及时处理大量接入请求，导致接入拥塞，降低终端接入成功概率[2]。因此，如何缓解接入拥塞，对 NB-IoT 规模化部署具有重要意义[3]。文献[4]总结了机器到机器（M2M, machine to machine）在长期演进（LTE, long term evolution）上的通信，分析比较了当前三大类随机接入技术——大规模接入控制技术、能耗技术及性能改进技术，发现随机接入信道过载问题是最主要的研究方向之一。文献[5]描述了 NB-IoT 的接入程序，并详细介绍了各种参数配置下的随机接入成功概率、平均时延等性能，列出了当前各类随机接入技术常用的评价指标。

机器类通信中缓解接入拥塞有多种方式，如接入类别限制（ACB, access class barring）方案、扩展接入限制（EAB, extended access barring）方案[4]。ACB 方案是通过比较基站广播的限制因子与终端产生随机接入参数的大小，选择符合条件的终端前导码并接入，限制部分不满足条件的终端接入以降低前导码冲突率。文献[6]修改了多种配置参数，比较了多种关键指标，证明 ACB 方案是能够用于拥塞控制的有效方案。针对不同流量模型，使用接入限制因子优化随机接入性能时要权衡成功接入概率和数据传输时间。因此，如何动态调整限制因子成为一个重要的研究方向[7]。在 ACB 方案基础上，文献[8]在不获取当前积压用户数的情况下，使用一种自适应 ACB 算法，控制网络中突发的流量拥塞，但前提是先确定所有设备的预期总接入时延。文献[9]提出一种接入控制方案，该方案采用了基于估计模型的自适应估计算法和 ACB 因子决策算法。仿真结果表明，该方案能有效降低随机接入失败率。在 ACB 方案基础上，EAB 方案允许广播中的参数在任意时间可以修改[4]，因此一定程度上能够有效应对突发性接入拥塞问题。文献[10]研究了 EAB 在不同参数设置下的随机接入性能。文献[11]提出两种增强的 EAB 方案，减少了前导码重传次数，是功率受限设备的理想选择。

除了上述 ACB 方案和 EAB 方案，一些重传、资源调度等方法也能够缓解接入拥塞。如非正交随机接入方案，利用非正交多址接入和连续干扰消除，可以提高系统吞吐率，但该方案不适用于大规模终端场景[12]。文献[13]利用马尔可夫链对冲突和队列长度引起的重传进行建模，该模型对优化接入过程和提高系统吞吐率有重要意义，但忽略了数据时延等参数。文献[14]研究了 NB-IoT 的前导码重复与随机接入过程中的重传机制，提出一种重复和重传值的最佳配置方法。文献[15]提出新的性能评估方法，研究了 NB-IoT 资源调度下基本参数对信道分配和数据调度的影响。但这些方案均未考虑小区间干扰，因此文献[16]在考虑小区间干扰存在的条件下，给出针对 NB-IoT 干扰感知资源分配算法及基于协作迭代算法的最优解方案，实验结果表明该方案可以在小区间干扰存在的情况下提高数据传输速率并降低能耗。文献[17]详细描述了机器类设备间通信存在的各种问题和挑战，提出机器学习在解决这些问题方面的潜在优势。在人与人（H2H, human to human）设备和 M2M 设备共存的情况下，文献[18]提出一种基于 Q 学习的随机接入算法，优先为 H2H 设备提供服务并最大化 M2M 设备接入数量，使 M2M 设备业务不影响 H2H 业务。虽然文献[16-18]在一定程度上能够有效改善系统性能，但迭代使得算法复杂度较高。

因此，本文提出设备能耗度定义，根据当前时隙能耗度将设备划分成高能耗度设备组和低能耗度设备组，使用机器学习中的动作、状态和奖励相关定义，根据当前状态—动作对计算奖励值以选取下一时隙最优动作、状态值，动态地将前导码分配给接入设备，优先满足高能耗度设备的前导码分配，再将剩余前导码和高能耗度设备组冲突前导码分配给低能耗度设备组。在实际环境中，设备优先等级可以由多种因素决定，但在设备能耗程度差距较大的应用场景下，本文根据能耗度高低进行设备优先级划分并优先为高能耗度设备分配前导码，能够减少高能耗度设备在退避或重传过程的能量消耗，对于系统中不同能耗度设备寿命的均衡具有一定意义。在平均能耗度和累计能耗度两种分组方式下，对此本文所提接入方案与传统接入方案，仿真结果表明本文所提方案能够在海量设备场景下提

高有限前导码利用率，从而改善接入成功率、吞吐量等系统性能。

2 系统模型

NB-IoT 通过增加重传次数等技术扩展其覆盖范围，各小区允许设备采用 3 种覆盖增强（CE, coverage enhancement）等级。其中，CE0 属于正常覆盖等级，支持最大耦合损耗 144 dB；CE1 属于较强覆盖等级，支持最大耦合损耗 144～154 dB；CE2 是最强覆盖等级，支持最大耦合损耗 164 dB[2]。本文仅考虑一个单小区海量设备系统，N 台 NB-IoT 设备随机分布，单小区设备分布如图 1 所示。

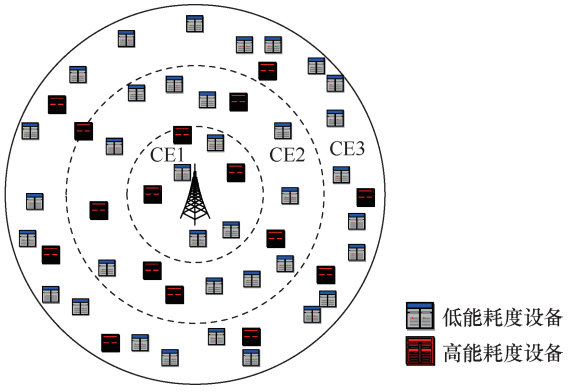

图 1 单小区设备分布

NB-IoT 与传统 LTE 相似，使用随机接入过程实现设备初始接入网络，完成上行同步。NB-IoT 系统支持两个无线资源控制（RRC, radio resource control）状态：空闲（RRC_Idle）状态和连接（RRC_Connected）状态[2]。其接入过程相关场景主要包括：RRC_IDLE 状态的初始化接入，RRC 连接重建，RRC_Connected 状态下接收下行数据、发送上行数据[2]。R13 版本中仅要求 NB-IoT 支持基于竞争的接入方式，基于竞争的随机接入示意图如图 2 所示。

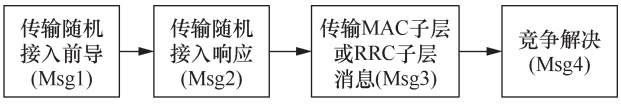

图 2 基于竞争的随机接入示意图

NB-IoT 设备在一段时间内发起接入请求，各时隙接入设备概率用设备激活概率 $n(t)$表示，$n(t)$服从 α=3、β=4 的 Beta 分布，如式(1)所示[8]。

$$n(t)=\frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1}\mathrm{B}(\alpha,\beta)} \tag{1}$$

其中，T 表示一段激活时间，设备在 T 时间内激活，$\mathrm{B}(\alpha,\beta)$ 是只与 α、β 有关的 Beta 函数。另外，假设在前导码随机分配过程中，接收相同前导码的设备认为接入失败，接入失败的设备随机退避时间为 10 ms，本文仅考虑首次退避时间。

根据式(1)可以计算出每个时隙发起接入请求的设备数 n_t，如式(2)所示。

$$n_t=N\int_{t-1}^{t}n(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

其中，N 是小区内设备总数，时隙 t 的取值为 $t=1,2,\cdots,L$，L 为时隙数。

3 基于 Beta 分布的接入方案

在每个接入时隙，首先根据式(2)计算各时隙接入请求数，检查当前是否能够为所有发起接入请求的 n 台设备提供所需前导码，如果前导码数大于或等于 n，则不对前导码分配添加限制，按照需求将前导码划分至所有设备；否则按照能耗度分组方式将设备划分成高能耗度设备组和低能耗度设备组，优先为高能耗度设备组分配前导码。本方案的目标是在每次接入过程中，当前传输能耗度较高的设备优先获得前导码接入，高能耗度设备组中的冲突前导码（若有两个及以上设备分配到相同前导码，则认为发生前导冲突）能够被低能耗度设备组二次使用，避免高能耗度设备在退避或重传中浪费仅有的能耗，提高前导码利用率，改善系统接入率、吞吐量等性能。

3.1 方案设计

假设单个小区系统中共有 N 台 NB-IoT 设备（包含上一周期请求失败的设备），计算本次能耗度，将其划分为两个不同的优先级组——高能耗设备度组和低能耗度设备组。将设备本次能耗度 O_{cur} 定义为本次传输所需能耗 P_{need} 与设备当前剩余能量 P_{last} 的比值，如式(3)所示。

$$O_{\mathrm{cur}}=\frac{P_{\mathrm{need}}}{P_{\mathrm{last}}} \tag{3}$$

其中，本次传输所需能耗 P_{need} 由设备接入基站根据前次传输能耗估计平均值得到，设备当前剩余能量 P_{last} 由设备总能耗减去各次传输能耗之和得到。

本文按照平均能耗度和累积能耗度两种方案对设备组进行划分，具体划分方案如下。

1) 方案一——平均能耗度

首先，按照式（4）计算平均能耗度，然后把 O_{cur}

低于 $O_{t,\mathrm{avg}}$ 的设备划分至低能耗设备组， O_{cur} 高于 $O_{t,\mathrm{avg}}$ 的设备划分至高能耗组。平均能耗度计算表达式定义为

$$O_{t,\mathrm{avg}}=\frac{O_{1,\mathrm{cur}}+O_{2,\mathrm{cur}}+\cdots+O_{n-1,\mathrm{cur}}+O_{n,\mathrm{cur}}}{n_t} \tag{4}$$

2) 方案二——累积能耗度

先将所有设备的 O_{cur} 按照从小到大的顺序排序，再按照式(5)计算累计能耗度，将前 k 个设备划分至低能耗度设备组，剩余设备划分至高能耗度设备组。对低能耗度设备组总能耗度与高能耗度设备组总能耗度作差后，绝对值最小时对应的 k 值即低能耗度设备数。累积能耗度的定义为

$$\left|\sum_{j=1}^{k}O_{j,\mathrm{cur}}-\sum_{j=k+1}^{n}O_{j,\mathrm{cur}}\right|=O_{\min} \tag{5}$$

对于上述两种方案，方案一从能耗度平均值角度划分高、低能耗度设备组，在系统能耗度差别较大时，可能会导致两种设备组内设备数量差距较大，如在系统内设备能耗度分布为{0.8,0.8,0.8,0.8,0.8,0.1}的场景下，高能耗度设备组设备数量远远高于低能耗度设备组的设备数量。方案二可以在一定程度上避免这种情况，侧重于均衡两种不同能耗度设备组内的设备数量。

使用机器学习中的动作、状态及奖励的定义，按照当前时隙状态—动作对计算奖励值以选取下一时隙最优动作、状态值，动态增加或减少高能耗度设备组可用前导码。

动作集合 actions：$[a_t^1,a_t^2,a_t^3,a_t^4,a_t^5,a_t^6,a_t^7]$，$a_t^i$ 表示时隙 t 可以采取的动作，对应含义为分配给高能耗度设备组的前导码数增加或减少 i 个。

状态集合 states：$[s_t^1,s_t^2,s_t^3,\cdots,s_t^{47},s_t^{48}]$，$s_t^m$ 表示在时隙 t 有 m 个可用前导码分配给高能耗度设备组，m 的取值在前导码数范围 $[1,M]$ 之内。

时隙 t 的奖励 r_t 为

$$r_t=p_{\mathrm{suc}}=\frac{n_{t,\mathrm{suc}}}{n_t} \tag{6}$$

平均吞吐量 t_p 定义为

$$t_p=\frac{n_{t,\mathrm{suc}}}{L} \tag{7}$$

首次平均退避时间 t_{backoff} 定义为

$$t_{\mathrm{backoff}}=\frac{t_{\mathrm{ba}}n_{t,\mathrm{col}}}{n_t} \tag{8}$$

在式(6)～式(8)中，$n_{t,\mathrm{suc}}$ 表示 t 时隙的接入成功设备数，p_{suc} 表示接入成功率，n_t 为 t 时隙发起接入设备数，L 为时隙数，t_{ba} 为接入失败设备首次退避时间，$n_{t,\mathrm{col}}$ 为 t 时隙接入失败设备数。

3.2 具体方案步骤

1)判断当前时隙接入设备数是否小于前导码总数，小于则将前导码随机分配给所有设备，否则先计算设备当前能耗度并据此划分为不同优先级组。

2)初始化当前状态 s_t，根据式(6)计算所有当前可能动作集合下的奖励值 r_t，选定最大奖励值 $r_{t,\max}$ 的对应动作 a_{t+1} 及下一状态 s_{t+1}。

3)根据状态 s_{t+1} 和动作 a_{t+1} 分别计算当前分配给高能耗度设备组前导码数的增加或减少量及低能耗度设备组可用前导码数。

4)为高能耗度设备组划分前导码，计算冲突前导码数。

5) 将低能耗度设备组可用前导码与冲突前导码分配给低能耗度设备组。

所提方案流程如图 3 所示，接入方案算法 1 所示。其中，仅在 $t=1$ 时隙的当前状态随机选择，而后每个时隙的当前状态为上一时隙选定的下一状态 s_{t+1}。

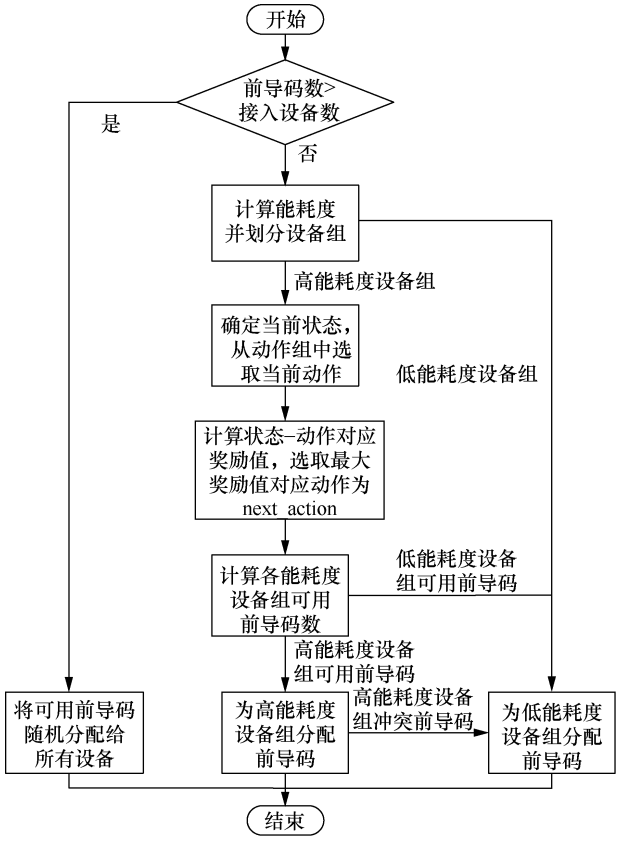

图 3　所提方案流程

算法 1　接入方案

输入　T、L、N、M、actions、states

1) 判断 n_t >M 以确定是否分组

2) 计算 O_{cur} 并分组

3) 初始化当前 state-action，计算 r_t

4) 选取 $r_{t,\max}$ 对应动作作为下一动作，计算高能耗度设备组可用前导码

5) 为高能耗度设备组分配前导码

6) 将剩余前导码与高能耗度设备组冲突前导码分配给低能耗度设备组

4　仿真分析

本文仿真参数说明如表 1 所示。其中，假设设备激活时间 T=120 s，时隙数 L=125，M=48，同一时隙分配到相同前导码的设备认定为接入失败，失败设备首次退避时间设为 10 ms，小区内总设备数 N 取值范围在[2 000, 8 000]。

表 1　　**仿真参数说明**

参数	含义
N	小区内总设备数
n_t	各时隙发起接入的设备数
T	周期（设备激活时间）
L	时隙数
M	一个时隙内可用前导码总数

Beta 分布下，按照方案一平均能耗度分组方式，使用 MATLAB 对本文所提分配方案与传统随机分配方案进行仿真，平均接入成功率对比、平均吞吐量对比及首次平均退避时间对比分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

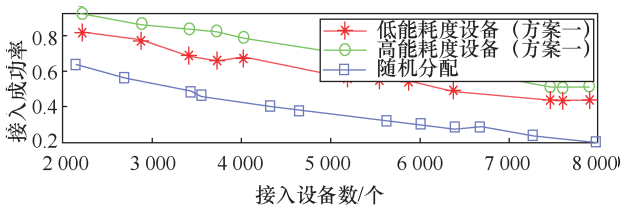

图 4　平均接入成功率对比

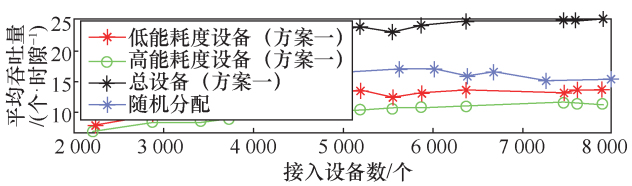

图 5　平均吞吐量对比

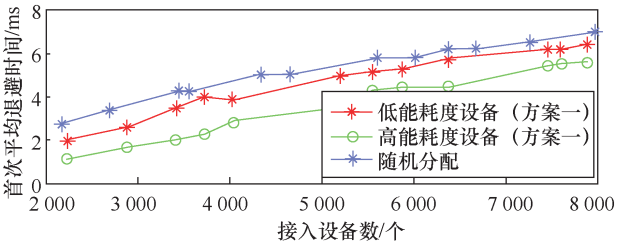

图 6　首次平均退避时间对比

从图 4 可以看出，当接入数不断增大时，本文所提方案的高能耗度设备组平均接入成功概率最高，低能耗度设备组平均接入成功率次之，但相比传统随机分配方案都有一定程度提高，能够有效提高系统平均接入成功率，对于高能耗设备组的提高尤为显著。从图 5 可以看出，当接入规模不断增大时，本文所提方案与传统随机分配方案相比，由于高能耗度设备组中冲突的前导码被分配给低能耗度设备组，平均吞吐量有一定提高，且随着设备规模的增大，本文方案下吞吐量更加稳定，传统随机分配方案吞吐量峰值出现地更早。从图 6 可以看出，在本文所提方案中，两种不同能耗度设备组的首次平均退避时间均低于传统随机分配方案的首次平均退避时间。

Beta 分布下，按照方案二累计能耗度分组方式，本文所提方案与传统随机分配方案中各组平均接入成功率对比、平均吞吐量对比及首次平均退避时间对比分别如图 7、图 8 和图 9 所示。

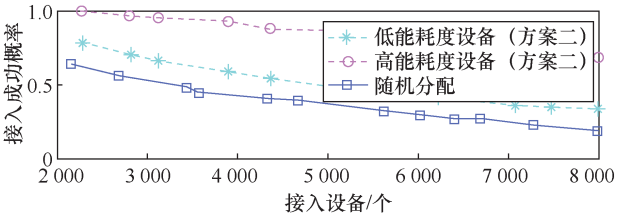

图 7　平均接入成功率对比

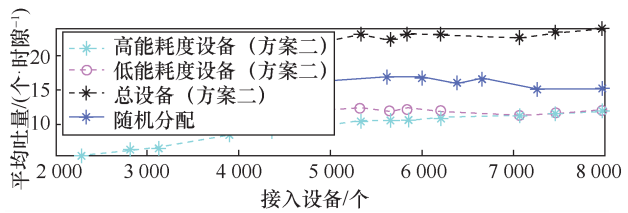

图 8　平均吞吐量对比

从图 7 可以看出，本文所提方案在接入规模不断增大时，高能耗度设备由于设备数较少，优先分配前导码后平均接入成功率明显提高，而高能耗度设备组的冲突前导码在低能耗度设备组中的再利

用，使得低能耗度设备组平均接入成功率较传统随机分配方案也有提高。由于本文所提方案下前导码利用率提高，从图 8 可以看出，设备平均吞吐量也有提高，且平均吞吐量峰值较传统随机方案出现地更晚。从图 9 可以看出，本文所提方案中高能耗度设备组首次平均退避时间与传统随机分配方案差别不大，但低能耗度设备组首次平均退避时间较传统随机分配方案显著降低，整体上节省了设备能耗。

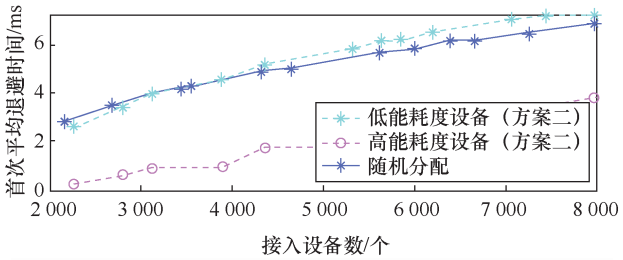

图 9　首次平均退避时间对比

Beta 分布下，按照方案一平均能耗度和方案二累计能耗度两种分组方式，本文所提方案的两种分组方式下平均接入成功率对比、平均吞吐量对比及首次平均退避时间对比分别如图 10、图 11 和图 12 所示。

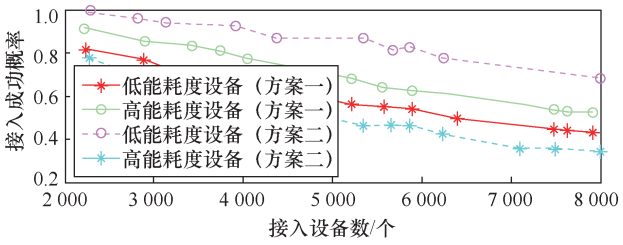

图 10　两种分组方式下平均接入成功率对比

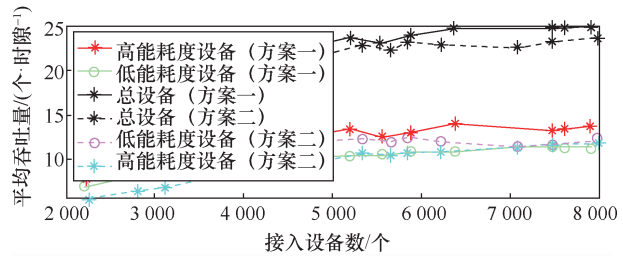

图 11　两种分组方式下平均吞吐量对比

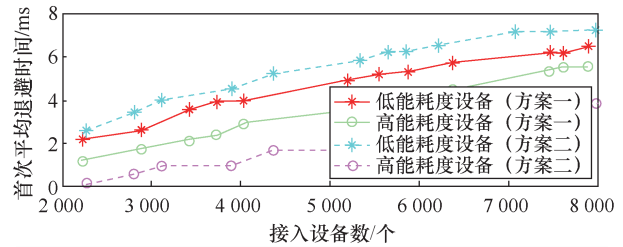

图 12　两种分组方式下首次平均退避时间对比

从图 10 可以看出，方案二累计能耗度分组下高能耗度设备数更少、低能耗度设备数更多，因此高能耗度设备组接入成功率更优，但低能耗度设备组接入成功率更低；而方案一平均能耗度分组下，两组设备接入成功率都有改善且差距更小。从图 11 可以看出，两种分组方式下，各组设备的平均吞吐量差距不大，平均能耗度分组下总设备吞吐量略大。从图 12 可以看出，与平均能耗度分组方式相比，累计能耗度分组方式由于设备数少且前导码优先分配，高能耗度设备组首次平均退避时间更低，但其低能耗度设备组首次平均退避时间也相对更高。

此外，Beta 分布下，ACB 方案与方案一/方案二分组下平均接入成功率对比、平均吞吐量对比及首次平均退避时间对比分别如图 13～图 18 所示。

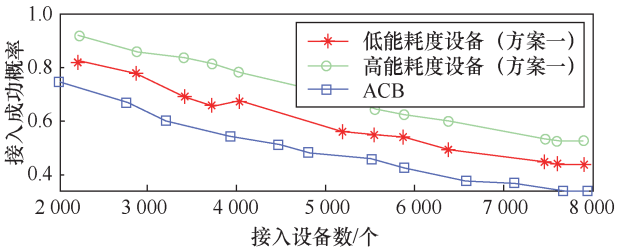

图 13　ACB 方案与方案一分组下平均接入成功率对比

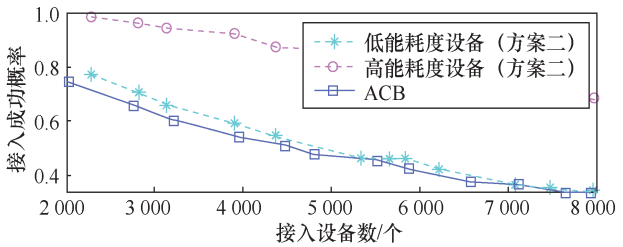

图 14　ACB 方案与方案二分组下平均接入成功率对比

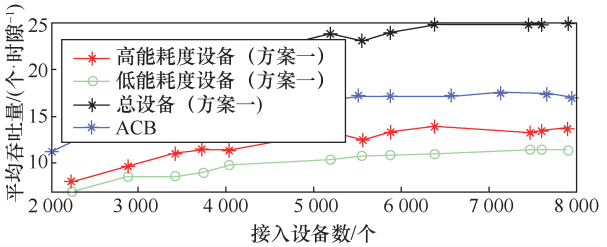

图 15　ACB 方案与方案一分组下平均吞吐量对比

从图 13～图 18 可以看出，与 ACB 方案相比，在两种分组方式下，随设备规模增大，本文所提方案的平均接入成功率降低得更加缓慢、平均吞吐量更优、不同设备组首次平均退避时间也略有改善。

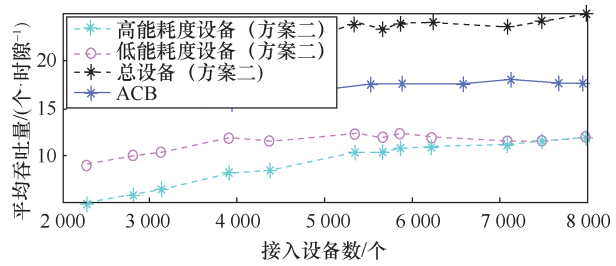

图 16　ACB 方案与方案二分组下平均吞吐量对比

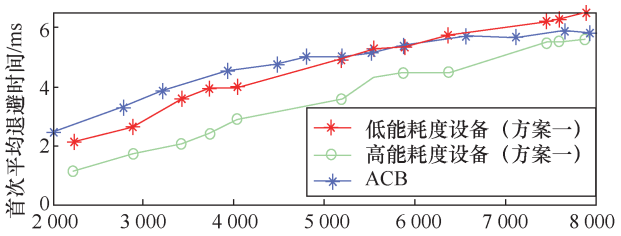

图 17　ACB 方案与方案一分组下首次平均退避时间对比

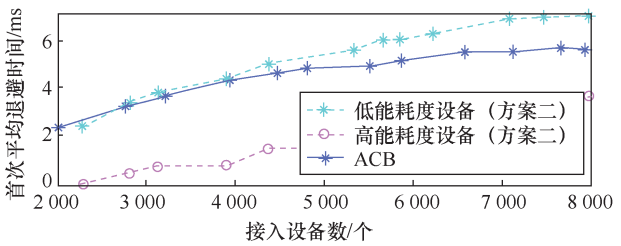

图 18　ACB 方案与方案二分组下首次平均退避时间对比

综上所述，本文所提方案较传统方案性能更优，若侧重高能耗度设备组接入性能则方案一根据平均能耗度分组方式更优，若要均衡两种不同能耗度设备组接入性能则方案二根据累计能耗度分组方式更佳。

5　结束语

本文针对NB-IoT单小区场景下海量接入问题，提出一种前导码分配方案。首先，定义设备各时隙业务能耗度，并根据平均能耗度和累计能耗度两种分组方式将设备划分为高能耗度设备组和低能耗度设备组。然后，定义动作集合和状态集合，根据当前状态—动作对计算奖励值，选取最大奖励值对应的动作为下一动作以确定分配给高能耗度设备组的前导码数增加或减少，优先考虑为高能耗设备组分配前导码，在不影响高能耗度设备组情况下，将剩余前导码与高能耗度设备组冲突前导码共同分配给低能耗设备组。仿真结果对比显示，本文所提前导码分配方案能够在接入规模较大的情况下，在一定程度上改善系统平均接入成功率、平均吞吐量及首次平均退避时间，且两种分组方式在性能改善方面各有侧重，在不同类型场景下可考虑采用不同分组方式。

参考文献：

[1] 工业和信息化部办公厅. 工业和信息化部办公厅关于深入推进移动物联网全面发展的通知[Z]. 2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. General Office of the Ministry of Industry and Information on the in-depth development of mobile Internet of things notice[Z]. 2020.

[2] 戴博, 袁弋非, 余媛芳. 窄带物联网(NB-IoT)标准与关键技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
DAI B, YUAN Y F, YU Y F. Standards and key technologies of narrow band IoT[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2016.

[3] CHEN M, MIAO Y M, HAO Y X, et al. Narrow band Internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20557-20577.

[4] ALTHUMALI H, OTHMAN M. A survey of random access control techniques for machine-to-machine communications in LTE/LTE-A networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 74961-74983.

[5] BARACAT G H, BRITO J M C. NB-IoT random access procedure analysis[C]//2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[6] 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.

[7] RAMINENI C, TIRUCHIRAI GOPALAKRISHNAN V. Impact of access class barring in narrow band Internet of things[J]. IET Wireless Sensor Systems, 2019, 9(6): 399-404.

[8] DUAN S Y, SHAH-MANSOURI V, WONG V W S. Dynamic access class barring for M2M communications in LTE networks[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 4747-4752.

[9] JUNG S Y, LEE S H, KIM J H. Reliability control framework for random access of massive IoT devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 49928-49937.

[10] CHENG R G, CHEN J, CHEN D W, et al. Modeling and analysis of an extended access barring algorithm for machine-type communications in LTE-A networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 2956-2968.

[11] VIDAL J R, TELLO-OQUENDO L, PLA V, et al. Performance study and enhancement of access barring for massive machine-type communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 63745-63759.

[12] WANG D, QU Y Y, FU Y L, et al. A non-orthogonal random access scheme based on NB-IoT[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 111(4): 2625-2639.

[13] SUN Y Y, TONG F, ZHANG Z K, et al. Throughput modeling and analysis of random access in narrowband Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1485-1493.

[14] HARWAHYU R, CHENG R G, TSAI W J, et al. Repetitions versus retransmissions: tradeoff in configuring NB-IoT random access channels[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3796-3805.

[15] HUANG C W, TSENG S C, LIN P, et al. Radio resource scheduling for narrowband Internet of Things systems: a performance study[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 108-115.

[16] MALIK H, PERVAIZ H, MAHTAB ALAM M, et al. Radio resource management scheme in NB-IoT systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15051-15064.

[17] SHARMA S K, WANG X B. Toward massive machine type communications in ultra-dense cellular IoT networks: current issues and machine learning-assisted solutions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2020, 22(1): 426-471.

[18] EL-HAMEED A S A, ELSAYED K M F. A Q-learning approach for machine-type communication random access in LTE-Advanced[J]. Telecommunication Systems, 2019, 71(3): 397-413.

[作者简介]

李梦雅（1997− ），女，江南大学物联网工程学院硕士生，主要研究方向为 NB-IoT 的海量接入。

李正权（1976− ），男，江南大学教授，主要研究方向为大规模 MIMO 技术、协作通信、物联网等。