

## 窄带物联网非连续接收机制功耗模型与优化

简鑫, 韦一笑, 刘钰芬, 宋健, 曾孝平, 谭晓衡

(重庆大学微电子与通信工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 针对窄带物联网 (NB-IoT) 的 3 种典型业务场景 (周期自动报告、异常自动报告和软件升级/重配置业务), 为 NB-IoT 扩展型非连续接收 (eDRX) 机制建立了以终端工作状态为状态变量的马尔可夫模型, 并给出相应的功耗与时延模型。其中, 连接态被分为随机接入态和数据收发态, 以细化因海量用户并发入网产生碰撞而带来的额外能耗。鉴于周期自动报告 (MAR-P) 业务的发生频次最高, 重点分析了 MAR-P 业务激励时 NB-IoT eDRX 机制的电池使用寿命及其优化设计方案。数值表明, 传输周期、最大随机接入次数、最大数据重传次数和系统负载直接决定电池使用寿命, 上述参数合理配置可有效延长电池使用寿命。这为 NB-IoT 终端行为建模与优化设计提供了参考。

**关键词:** 窄带物联网; 扩展型非连续接收; 马尔可夫链; 功耗模型

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019094

## Power consumption modeling and optimization for NB-IoT eDRX

JIAN Xin, WEI Yixiao, LIU Yuqin, SONG Jian, ZENG Xiaoping, TAN Xiaoheng

College of Micro-Electronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract:** To extend the battery life of massive machine type devices (MTD), narrow-band Internet of things (NB-IoT) system extended discontinuous reception (eDRX) mechanism of LTE to the maximum as well as introduced a lower power state named as power saving mode (PSM). Three Markov models were established for three typical NB-IoT traffic scenarios, which called mobile autonomous reporting periodic report (MAR-P), mobile autonomous reporting exception report (MAR-E), software update/reconfiguration (SUR). The states of each Markov model were the working status of MTDs, including connected, idle and PSM state, in which the connected state was divided into random access state and data translating/receiving state to further evaluate the additional power consumption caused by collisions from massive MTDs concurrent access. Thereby, the power consumption and delay models with respect to each traffic scenarios were derived. Since the frequency of MAR-P traffic was far greater than the other two, the battery life of this traffic case with its optimal design choice was comprehensively analyzed. Numerical results show that, the battery life is mostly influenced by transmission period, maximum number of random access attempts, maximum number of data transmissions and traffic load, which can be maximized by appropriate parameters setting up. These works provide good references for NB-IoT device behavior modeling and optimization design.

**Key words:** narrow-band Internet of things, extended discontinuous reception, Markov chain, power consumption modeling

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501065, No.61601067, No.61571069); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金资助项目 (No.cstc2016jcyjA0021); 中央高校基本科研业务费基金资助项目 (No.2018CDXYTX0009)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61501065, No.61601067, No.61571069), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No.cstc2016jcyjA0021), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2018CDXYTX0009)

## 1 引言

窄带物联网 (NB-IoT, narrow-band Internet of things) 是 3GPP 为智能电表、环境监测等以传感和数据采集为目标的应用场景提出的一种低功耗广域覆盖技术, 面临海量连接、超低功耗、广域覆盖与深度覆盖等技术挑战。NB-IoT 超低功耗技术的基本目标是终端使用 5 Wh 电池可达到 10 年的寿命周期, 其主要实现途径是进一步扩展 LTE 的非连续接收 (DRX, discontinuous reception) 机制, 以下简称扩展型非连续接收 (eDRX, extended DRX), 以最大限度降低终端不进行数据交互时的电量消耗。eDRX 支持更长的 DRX 周期 (最长可达 10.24 s), 并引入具有更低能耗的节能态 (PSM, power saving mode)。节能态是 NB-IoT 在 LTE 连接态 (connected mode)、空闲态 (idle mode) 基础上增加的第三种终端工作模式。不同工作模式对应着不同的功耗水平, 不同工作模式间的切换受控制信令驱动, 控制信令由系统参数和 NB-IoT 不同业务场景的触发事件决定, 如图 1 所示。因此, 为完成 NB-IoT eDRX 能耗水平的性能分析与优化设计, 必须合理地建模 NB-IoT 终端工作模式切换与控制信令、控制信令与应用背景之间的关系<sup>[1-4]</sup>。

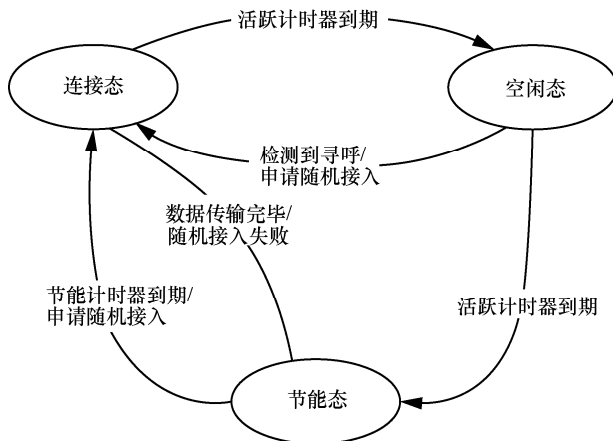


图 1 NB-IoT 终端工作模式

DRX 机制起源于人与人 (H2H, human to human) 通信场景下的节能需要。目前, 针对 H2H 业务场景下的 DRX 机制研究中, 文献[5]推导了终端引入 DRX 机制后传输时延的概率密度函数与节能效率。文献[6]对比了突发型与流式型业务激励时 CDMA2000 及 WCDMA 系统的节能性能。文献[7]将终端工作过程/数据传输过程分成多个独立的子

过程, 并进行线性叠加求得其整体能耗及时延。文献[8]以 3 000 多名安卓用户的现网测试数据导出了 LTE 网络的综合功率模型。上述文献主要针对下行业务为主的 H2H 通信场景, 其研究成果无法直接应用于周期性上行数据为主的机器与机器 (M2M, machine to machine) 通信场景<sup>[9]</sup>。

针对 M2M 通信场景下的特点, 文献[10]将终端各状态能耗进行简单叠加, 分析了 DRX 机制的整体能耗。文献[11-14]通过分析终端的 DRX 行为模式, 构建相应的马尔可夫链。文献[15]提出一种带快速睡眠指示的改进型 DRX 机制, 并用半马尔可夫的方法分析了该改进型机制的平均能耗及时延。文献[16]通过叠加 TAU 更新及寻呼监听两部分的平均能耗, 研究 IDLE 态 eDRX 休眠周期的最优配置。上述文献对采用 LTE 通信方式的 M2M 终端功耗进行了宏观建模, 重点关注了连接态与空闲态的建模, 较少关注引入节能态后的 NB-IoT eDRX 功耗模型。另外, 众所周知的是无线通信中终端的能耗集中产生于空闲监听、接入冲突与过度监听, 上述文献多评估引入 DRX 机制后终端空闲监听或过度监听的能耗, 几乎未考虑接入冲突引入的功耗, 因此很难有效评估海量机器类终端同步入网时因并发用户过多导致碰撞而产生的能耗问题<sup>[17-18]</sup>。本文首先将连接态进一步细分为随机接入 (RACH, random access channel) 和数据收发 (Tx/Rx, transmit/receive) 2 个状态, 以细化因接入冲突带来的能耗, 并根据 NB-IoT 终端承载终端周期自动报告 (MAR-P, mobile autonomous reporting periodic report) 业务、终端异常自动报告 (MAR-E, mobile autonomous reporting exception report) 业务与软件升级/重配置 (SUR, software update/reconfiguration) 业务时的工作模式切换关系, 为每一种业务场景建立了以随机接入态、数据收发态、空闲态、PSM 节能态 4 个 NB-IoT 终端工作状态为状态变量的 Markov 模型, 给出了对应的 NB-IoT 终端能耗模型和时延分析方法; 然后, 针对发生频次较高的 MAR-P 业务, 在保证业务传输成功率的前提下, 完成了随机接入申请次数上限、最大数据传输次数上限的优化配置设计。

## 2 NB-IoT eDRX 功耗模型与时延分析

### 2.1 NB-IoT 典型业务场景

NB-IoT 主要应用于智能水电气表、环境监测、

智能家电等低移动性场景。本文参考 3GPP Release 13 中所描述的窄带物联网业务模型和典型应用场景<sup>[3-4]</sup>，列出了 NB-IoT 的 3 种典型业务场景的主要特征，如表 1 所示。其中，MAR-P 业务是指终端以固定周期向基站上报检测数据，周期长度由业务需求决定，如智能水表、智能农业等业务；MAR-E 业务是指终端检测到异常数据时立即向基站上报，如烟雾探测器等；SUR 业务主要用于对终端进行软件升级或重配置。MAR-P 和 MAR-E 业务一般由终端触发，属于上行数据流；SUR 业务一般由基站发起，属于下行数据流。本文根据 NB-IoT 终端承载不同业务时其工作模式的切换关系，为每一种业务场景建立了以 NB-IoT 终端工作状态为状态变量的 Markov 模型，并给出对应的 NB-IoT 终端能耗模型和时延分析方法。鉴于海量机器类终端同步入网时随机接入失败概率较大、随机接入重传次数较多，为评估该现象的影响，本文进一步将连接态分为随机接入 (RACH) 和数据收发 (Tx/Rx) 2 个状态。

### 2.2 MAR-P 业务的功耗模型与时延分析

图 2 描述了 NB-IoT 终端承载 MAR-P 业务时终端状态转移情况。以每个触发周期为起点，各状态间的转移关系可概述如下。1) 终端处于 PSM 状态 ( $S_1$ ) 时，终端进入休眠并启动休眠计时器  $T_p$ ，若计时器到期便触发 MAR-P 业务申请并发起随机接入申请入网。2) 终端处于 RACH 状态 ( $S_2$ ) 时，终端进行随机接入申请，若随机接入失败次数达到系统规定的阈值  $R_{max}$  时，终端认为当前信道质量极度不佳，将返回 PSM 状态 ( $S_1$ ) 等待下一次触发周期；若随机接入成功，则进入 Tx/Rx 状态 ( $S_3$ ) 进行数据收发。3) 当终端处于 Tx/Rx 状态 ( $S_3$ ) 时，若数据发送成功 (本文设 MAR-P 业务仅含一个数据分组)，则传输完毕，直接返回 PSM 状态进行休眠；若数据传输失败次数达到系统规定的阈值  $N_{max}$  时，终端将在第  $N_{max}$  次传输失败后释放随机接入资源进入 idle 状态 ( $S_4$ )。4) 终端处于 idle 状态 ( $S_4$ ) 时，终端启动计时器  $T_i$  并监视相应信道，等待基站反馈数据应答分组 (ACK)，若收到应答分组，直接返回 PSM 状态 ( $S_1$ )；若  $T_i$  计时器到时未收到数

据应答分组，终端将尝试再次进行随机接入 ( $S_2$ )。

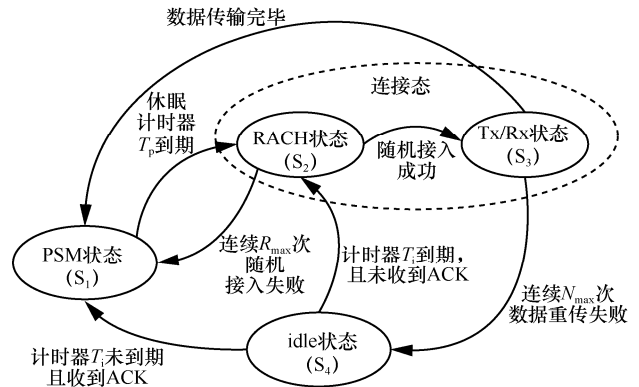


图 2 NB-IoT 终端承载 MAR-P 业务时状态转移

设终端每次随机接入失败的概率为  $p_r$ 、平均退避时间为  $T_r$ ，每次随机接入成功后终端收到反馈信息的时间服从参数为  $\lambda_r$  的指数分布；每次数据传输的失败概率为  $p_t$ 、平均重传时间为  $T_{ARQ}$ ，每次数据传输成功后收到 ACK 应答分组的时间服从参数为  $\lambda_t$  的指数分布。令  $P_{kl}$  表示终端从状态  $S_k$  到状态  $S_l$  的转移概率， $k, l \in \{1,2,3,4\}$ 。如图 2 所示，NB-IoT 终端承载 MAR-P 业务时的 Markov 模型的概率转移矩阵可表示为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{21} & 0 & 1 - P_{21} & 0 \\ 1 - P_{34} & 0 & 0 & P_{34} \\ 1 - P_{42} & P_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $P_{12}=1$ ，这是因为承载 MAR-P 业务时，终端必定在  $T_p$  的整数倍时刻被唤醒，唤醒后直接进入状态  $S_2$ ； $P_{21}=p_r^{R_{max}}$  且  $p_r=1-e^{-\frac{m}{n}}$ ， $n$  为随机接入前导码资源数， $m$  为并发用户数<sup>[19]</sup>， $\frac{m}{n}$  反映了当前网络拥堵程度， $\frac{m}{n}$  越大表明当前网络拥堵程度越严重，本文将  $\frac{m}{n} > 1.0$  的状态视为网络拥堵状态； $P_{34}=p_t^{N_{max}}$ ； $P_{42}=p_t$ ， $p_t$  与传输环境有关，反映了当前传输环境质量， $p_t$  越大表明当前传输环境质量越差。令  $q_k$  表示状态  $S_k$  的稳态概率， $k \in \{1,2,3,4\}$ ，

表 1

NB-IoT 的 3 种典型业务场景的主要特征

业务类别	传输数据类型	数据规模/B	发生时间间隔
周期自动报告	定期上传信息	20~200	1 d (40%)、2 h (40%)、1 h (15%)、30 min (5%)
异常自动报告	异常突发信息	20~200	几个月甚至几年
软件升级/重配置	软件升级补丁	200~2 000	约 180 d

则  $q_k > 0$  且  $\sum_{k=1}^4 q_k = 1$ , 由  $q_l = \sum_{k=1}^4 q_k P_{kl}$  可得各个状态下的稳态概率为<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1 + P_{21}P_{34}P_{42} - P_{34}P_{42}}{3 + P_{34} + P_{21}P_{34}P_{42} - P_{21} - P_{21}P_{34} - P_{34}P_{42}} \\ q_2 = \frac{1}{3 + P_{34} + P_{21}P_{34}P_{42} - P_{21} - P_{21}P_{34} - P_{34}P_{42}} \\ q_3 = \frac{1 - P_{21}}{3 + P_{34} + P_{21}P_{34}P_{42} - P_{21} - P_{21}P_{34} - P_{34}P_{42}} \\ q_4 = \frac{P_{34} - P_{21}P_{34}}{3 + P_{34} + P_{21}P_{34}P_{42} - P_{21} - P_{21}P_{34} - P_{34}P_{42}} \end{cases} \quad (2)$$

令  $E_p(k)$ 、 $D_p(k)$  分别表示状态  $S_k$  下终端的平均能耗和平均时延,  $W_k$ 、 $T_k$  分别表示终端在  $S_k$  状态的功率和平均持续时间,  $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。则 NB-IoT 终端承载 MAR-P 业务的平均功耗  $E_p$  和平均时延  $D_p$  可分别表示为

$$E_p = \sum_{k=1}^4 q_k E_p(k) \quad (3)$$

$$D_p = \sum_{k=1}^4 q_k D_p(k) \quad (4)$$

其中,  $E_p(1) = W_1 T_1 = 0$ , 这是因为本文以每个触发周期为起点研究单次数据传输的功耗与时延, 即休眠期  $T_p$  到期便触发周期 MAR 业务, 因此平均持续时间为 0;  $E_p(2) = E_{RACH} \bar{R}$ ,  $\bar{R} = \sum_{j=0}^{R_{max}} j (p_r)^j$  表示随机接入平均失败次数,  $E_{RACH}$  表示终端发送 1 次随机接入申请所需能耗;  $E_p(3) = E_{TR} \bar{N}$ ,  $\bar{N} = \sum_{j=0}^{N_{max}} j (p_t)^j$  表示数据传输平均失败次数,  $E_{TR}$  表示终端进行一次数据收发所需能耗;  $E_p(4) = W_4 T_4$ 。

在单次 MAR-P 业务下, 设休眠计时器  $T_p$  到期 (即休眠结束后) 便触发业务, 则状态  $S_1$  的平均时延为  $D_p(1) = 0$ , 状态  $S_2$  的平均时延为

$$D_p(2) = (1 - p_r^{R_{max}}) \left( T_r \bar{R} + \int_0^{T_r} t \lambda_t e^{-\lambda_t t} dt \right) + p_r^{R_{max}} R_{max} T_r \quad (5)$$

其中, 式(5)等号右边的前半部分表示终端随机接入成功的平均时延, 后半部分表示终端随机接入失败的平均时延。状态  $S_3$  的平均时延为

$$D_p(3) = (1 - p_t^{N_{max}}) \left( T_{ARQ} \bar{N} + \int_0^{T_{ARQ}} t \lambda_t e^{-\lambda_t t} dt \right) + p_t^{N_{max}} N_{max} T_{ARQ} \quad (6)$$

其中, 式(6)等号右边的前半部分表示数据传输成功的平均时延, 后半部分表示数据传输失败的平均时延。状态  $S_4$  的平均时延为

$$D_p(4) = \int_0^{T_i} t \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt + \int_{T_i}^{\infty} T_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt = \frac{1 - e^{-\lambda_i T_i}}{\lambda_i} \quad (7)$$

其中, 式(7)等号之间的前半部分表示收到第  $N_{max}$  次数传 ACK 的平均时延, 后半部分表示未收到第  $N_{max}$  次数传 ACK 的平均时延。至此, 已完成 MAR-P 业务下 NB-IoT 终端的功耗与时延分析。

### 2.3 MAR-E 业务的功耗模型与时延分析

图 3 描述了 NB-IoT 终端承载 MAR-E 业务时终端状态转移情况。与 MAR-P 业务下的不同之处在于: 当终端处于 PSM 状态时, 若检测到数据突变等非正常事件发生便触发 MAR-E 业务申请, 并发起随机接入申请入网。

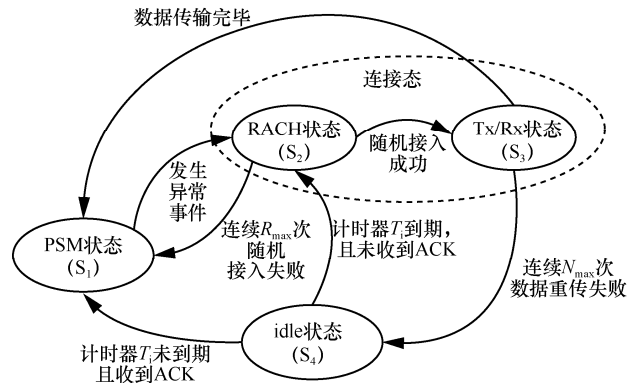


图 3 NB-IoT 终端承载 MAR-E 业务时状态转移

NB-IoT 终端承载 MAR-E 业务时的状态转移、稳态概率及平均功耗与终端承载 MAR-P 业务完全相同, 分别如式(1)~式(3)所示。

NB-IoT 终端承载 MAR-E 业务的平均时延  $D_E$  可表示为

$$D_E = \sum_{k=1}^4 q_k D_E(k) \quad (8)$$

在单次 MAR-E 业务下, 设 MAR-E 业务触发后数据分组产生的处理时间为  $T_e$ , 状态  $S_1$  的平均时延为  $D_E(1) = T_e$ ; 其余状态下的时延与单次 MAR-P 业务下相应状态的时延相同, 分别如式(5)~式(7)所示。至此, 本节已完成 MAR-E 业务下 NB-IoT 终端的功耗与时延分析。

### 2.4 SUR 业务的功耗模型与时延分析

图 4 描述了 NB-IoT 终端承载 SUR 业务时终端状态转移情况。具体过程如下。1) 终端内置更新计时器  $T_u$ ，更新计时器到期后检测缓存中是否存在寻呼消息并重启计时器，若无则返回状态  $S_1$  休眠，若存在即触发 SUR 业务并发起随机接入申请入网。2) 当终端处于  $S_3$  状态时，若接收到所有 SUR 业务数据分组(设单次 SUR 业务所传输数据分组个数为  $A$ )，则重启更新计时器并返回状态  $S_1$  进行休眠；若终端等待其中一个数据分组的用时超出等待时间窗  $T_w$ ，则终端释放随机接入资源进入状态  $S_4$ 。3) 当终端处于状态  $S_4$  时，启动计时器  $T_i^U$  并监视相应信道，若期间监测到下行数据到达，终端将尝试再次进行随机接入。 $T_i^U$  为 SUR 业务下的 idle 状态计时器。

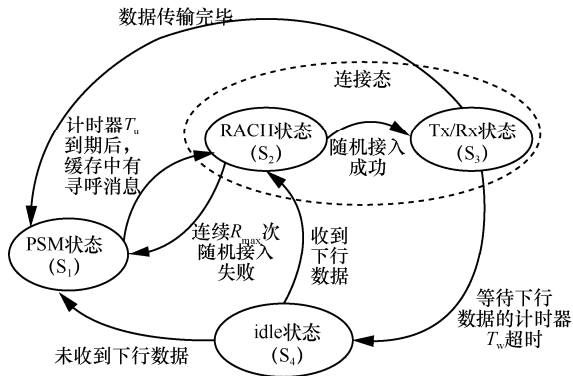


图 4 软件更新/重配置下 NB-IoT 终端状态转移

设相邻 2 个数据分组的到达时间间隔服从参数为  $\lambda$  的指数分布。如图 4 所示，NB-IoT 终端承载 SUR 业务时的 Markov 模型的概率转移矩阵可表示为

$$P^U = \begin{bmatrix} P_{11}^U & P_{12}^U & 0 & 0 \\ P_{21}^U & 0 & P_{23}^U & 0 \\ P_{31}^U & 0 & 0 & P_{34}^U \\ P_{41}^U & P_{42}^U & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ (p_r)^{R_{\max}} & 0 & 1 - (p_r)^{R_{\max}} & 0 \\ 1 - e^{-\lambda T_w} & 0 & 0 & e^{-\lambda T_w} \\ e^{-\lambda T_i^U} & 1 - e^{-\lambda T_i^U} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中， $P_{34}^U = P[t > T_w] = \int_{T_w}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda T_w}$ ， $P_{41}^U = P[t > T_i^U] = \int_{T_i^U}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda T_i^U}$ 。由式(9)及  $\sum_{k=1}^4 q_k^U = 1$ 、 $q_i^U = \sum_{k=1}^4 q_k^U P_{ki}^U$  可得状态  $S_k$  的稳态概率  $q_k^U$ 。

NB-IoT 终端承载 SUR 业务的平均功耗  $E_U$  和平均时延  $D_U$  可分别表示为

$$E_U = \sum_{k=1}^4 q_k^U E_U(k) \quad (10)$$

$$D_U(1) = 0 \quad (11)$$

其中， $E_U(1)=0$ ， $E_U(2)=E_{RACH}\bar{R}$ ， $E_U(3)=E_{TR}A$ ， $E_U(4)=W_4T_i^U$ 。

在单次 SUR 业务下，设休眠计时器  $T_u$  到期(即休眠结束后)便触发业务，则状态  $S_1$  的平均时延为  $D_U(1)=0$ ；状态  $S_2$  平均时延为  $D_U(2)=D_P(2)$ ，如式(5)所示；状态  $S_3$  平均时延为  $D_U(3) = A \int_0^{T_w} t \lambda e^{-\lambda t} dt$ ；与式(7)同理有，SUR 业务下状态  $S_4$  平均时延为  $D_U(4) = \frac{1 - e^{-\lambda T_i^U}}{\lambda}$ 。至此，本节已完成 SUR 业务下 NB-IoT 终端的功耗与时延分析。

### 3 基于电池使用寿命的优化设计

如表 1 所示，MAR-P 业务发生频次远大于 MAR-E 业务与 SUR 业务，即在时间段  $T_L$  内终端的总功耗  $E$  近似为该时间段内终端传输 MAR-P 业务所消耗的功耗，如式(12)所示。

$$E = E_{\text{业务}} + E_{\text{休眠}} = \frac{T_L}{T_p} E_p + (T_L p_E) E_p + \frac{T_L}{T_u} E_U + T_L W_1 \approx \frac{T_L}{T_p} E_p + T_L W_1 \quad (12)$$

其中， $p_E$  表示发生突发事件的概率。当电池所能提供的总能量  $E$  固定时，电池使用寿命  $L$  可表示为

$$L = T_L = \frac{E}{\frac{E_p}{T_p} + W_1} \quad (13)$$

综上所述，可建立以下优化模型。

$$\begin{aligned} & \max L \\ & \text{s.t.} \begin{cases} L \geq 10 \text{年} \\ P_{RACH} \geq P_{RACH, \text{set}} \\ P_{TR} \geq P_{TR, \text{set}} \\ R_{\max}, N_{\max} \geq 1, \text{ 且为整数} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $P_{RACH} = 1 - (1 - e^{-\frac{m}{n}})^{R_{\max}}$ 、 $P_{TR} = 1 - (p_t)^{N_{\max}}$  分别表示随机接入成功率和数据传输成功率， $P_{RACH, \text{set}}$ 、 $P_{TR, \text{set}}$  分别表示 NB-IoT 系统所要求的随机接入和数据传输成功率下限。

式(14)优化模型中可引入时延约束，但 NB-IoT

对时延具有较高容忍性，且为了保证海量 NB-IoT 终端同步入网及恶劣通信环境下的业务传输成功率，本文以随机接入及数据传输成功率为约束，最大化电池使用寿命为优化目标。由第 2.2 节可知，终端经历  $N_{\max}$  次数据传输失败后，再次入网并成功传输数据的概率极小，可忽略不计，因此本文定义单次业务传输成功率  $P_{\text{suc}}$ （以下简称业务成功率）为

$$P_{\text{suc}} = P_{\text{RACH}} P_{\text{TR}} = \left[ 1 - (1 - e^{-\frac{m}{n}})^{R_{\max}} \right] \left[ 1 - (p_t)^{N_{\max}} \right] \quad (15)$$

由式(3)和式(13)并结合实际通信场景可得， $E$  和  $W_1$  受硬件制约往往为固定值， $T_p$  可设定为 MAR-P 业务的周期，而  $\frac{m}{n}$ 、 $p_t$  分别受网络质量及传输环境的影响，极难调控，因此  $R_{\max}$  和  $N_{\max}$  的设定对  $L$  及  $P_{\text{suc}}$  的调控起到极为关键的作用。另外，由于  $\frac{m}{n}$ 、 $p_t$  的变化具有实时性，需要观察单次业务成功传输时延及业务成功率随之的变化趋势。鉴于 MAR-P 业务发生频次极高，将 MAR-P 业务传输时延作为时延指标，平均每成功传输一次业务需传输  $\frac{1}{P_{\text{suc}}}$  次业务并休眠  $\frac{1}{P_{\text{suc}}} - 1$  次，则单次业务传输时延  $D$ （以下简称业务时延）如式(16)所示。

$$D = \frac{D_p}{P_{\text{suc}}} + \left( \frac{1}{P_{\text{suc}}} - 1 \right) T_p \quad (16)$$

其中，式(16)等号右边的前半部分表示传输时延，后半部分表示休眠时延。

## 4 数值分析

### 4.1 $T_p$ 对 $L$ 、 $D$ 的影响

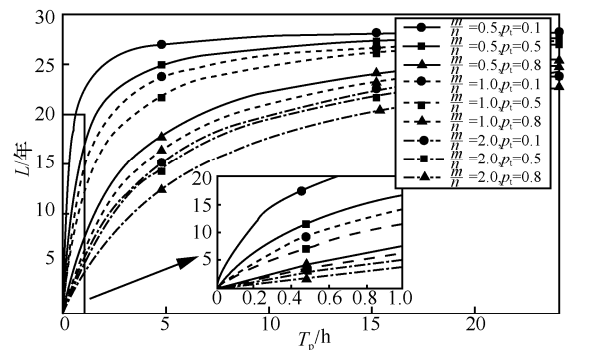
依据文献[1-2, 13, 18]，表 2 列出了仿真验证所需的主要参数配置。其余参数还包括： $\frac{m}{n} = \{0.5, 1.0, 2.0\}$  分别表示 {较少, 临界饱和, 过多} 的并发用户数量， $p_t = \{0.1, 0.5, 0.8\}$  分别表示 {优, 中, 差} 的数据传输环境质量。

图 5 描述了当  $R_{\max} = 8$ 、 $N_{\max} = 8$ 、 $\frac{m}{n} = \{0.5, 1.0, 2.0\}$ 、 $p_t = \{0.1, 0.5, 0.8\}$  时， $T_p$ （单位为 h）对  $L$  的影响， $T_p \in (0, 24]$ 。由图 5 可知，1) 随着  $T_p$  的增加， $L$  和  $D$  增大；2) 当  $(\frac{m}{n}, p_t) = \{(0.5, 0.1), (1.0, 0.5), (2.0, 0.8)\}$ ， $T_p$  分别需大于或等于 0.173 h、0.79 h、3.5 h，才能使电池使用寿命达到 10 年。这意味着，

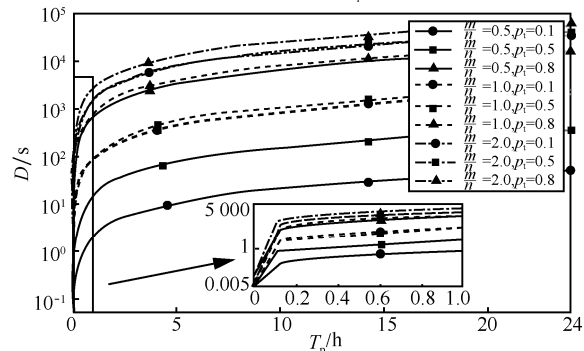
当  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  均为固定值时，延长休眠时间  $T_p$  有助于延长电池使用寿命，但会使业务时延增加；若终端长时间处于过多并发用户数或恶劣数据传输环境，其电池寿命将会缩短。为避免极端通信环境及  $T_p$  对结果产生影响，后续实验仿真将以“中等”通信环境为背景，即  $\frac{m}{n} = 1.0$ 、 $p_t = 0.5$ ，并取  $T_p$  为 1 h。

表 2 参数设置

参数	取值
$E/\text{Wh}$	5
$W_1/\text{mW}$	0.02
$W_2/\text{mW}$	100
$E_{\text{RACH}}、E_{\text{TR}}/\text{J}$	0.05
$\frac{1}{\lambda_r}、\frac{1}{\lambda_t}/\text{ms}$	5
$T_r、T_{\text{ARQ}}/\text{ms}$	8
$T_f/\text{ms}$	64



(a) 电池使用寿命  $L$  随  $T_p$  变化情况



(b) 业务时延  $D$  随  $T_p$  变化情况

图 5  $T_p$  对  $L$ 、 $D$  的影响 ( $R_{\max} = 8$ 、 $N_{\max} = 8$ )

### 4.2 $R_{\max}$ 与 $N_{\max}$ 对 $L$ 、 $D$ 与 $P_{\text{suc}}$ 的联立影响

图 6 描述了当  $\frac{m}{n} = 1.0$ 、 $p_t = 0.5$  时， $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  的影响。由图 6 可知，1) 随着  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  的增加， $L$ 、 $D$  减小， $P_{\text{suc}}$  增大；2) 当  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  分别在  $[1, 8]$  范围内变化时， $L$ 、 $D$  及  $P_{\text{suc}}$  变化幅

度较大；3) 当  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  具有相同的增量时， $L$ 、 $D$  及  $P_{\text{suc}}$  随  $R_{\max}$  的变化趋势更大。这意味着  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  的增加可增加业务成功率并减小业务时延，但这是以减小电池使用寿命为代价的，并且  $R_{\max}$  对终端能耗和时延的影响相对较大。为更显著地观察不同  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  配置下  $\frac{m}{n}$ 、 $p_t$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  的影响，后续实验仿真将  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  取值区间定为[1,8]。

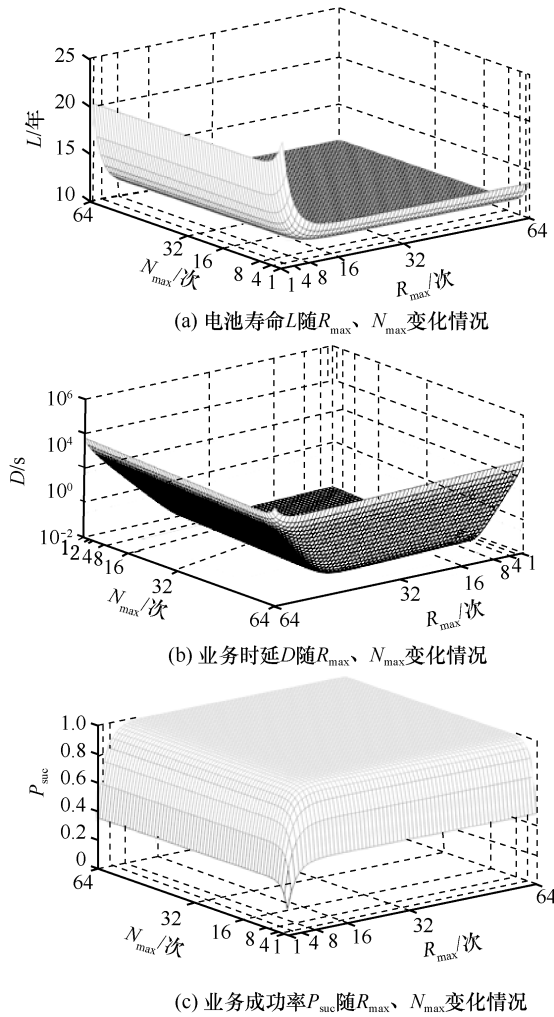


图 6  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  的影响 ( $\frac{m}{n}=1.0, p_t=0.5, T_p=1 \text{ h}$ )

### 4.3 $\frac{m}{n}$ 、 $p_t$ 对 $L$ 、 $D$ 及 $P_{\text{suc}}$ 的影响

图 7 描述了当  $N_{\max}=8$ 、 $p_t=0.5$ 、 $R_{\max}=\{1,2,4,8\}$  时， $\frac{m}{n}$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  的影响。由图 7 可知，1) 随着  $\frac{m}{n}$  的增加， $R_{\max}=1$  时  $L$  轻微增加后趋于平缓，而  $R_{\max}=\{2,4,8\}$  时  $L$  先减小，但随后均逐渐趋于平缓；

2) 随着  $\frac{m}{n}$  的增加， $D$  整体呈指数增长或对数线性增加， $P_{\text{suc}}$  减小并逐渐趋于 0；3) 当  $\frac{m}{n} < 1$  时， $\frac{m}{n}$  的增加对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  所造成的变化相对较小；4) 当  $\frac{m}{n} > 1$  时，若  $R_{\max}$  越大，则  $L$  随  $\frac{m}{n}$  变化的速度与程度越大，而  $D$ 、 $P_{\text{suc}}$  随  $\frac{m}{n}$  减小的速度越小。这意味着：1)  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  随着  $\frac{m}{n}$  增加的变化趋势验证了文献[1-2]定性分析的正确性；2) 随着并发用户的增加，终端在随机接入阶段需要重复进行多次随机接入申请，当  $\frac{m}{n}$  增大至一定程度时，终端随机接入失败次数达到  $R_{\max}$  上限，无法进入下一阶段传送数据而返回休眠状态，使  $L$  趋于平缓， $D$  持续增加且  $P_{\text{suc}}$  减小；3) 当网络拥堵时，若  $R_{\max}$  配置较大，网络拥堵程度  $\frac{m}{n}$  将直接决定电池使用寿命，但对业务时延及业务成功率造成的影响相对较小。上述结论验证了将连接态分为随机接入态和数据收发态这 2 个状态以建立 NB-IoT 功耗模型的重要意义，可具体描述因海量终端同步入网产生碰撞的能耗及时延特性。

图 8 描述了当  $R_{\max}=8$ 、 $\frac{m}{n}=1.0$ 、 $N_{\max}=\{1,2,4,8\}$

时， $p_t$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{\text{suc}}$  的影响。由图 8(a) 可知， $L$  随着  $p_t$  的增加而持续减小。这意味着当数据传输环境较好时，终端可在  $N_{\max}$  次数据传输内成功传输数据，电池使用寿命相对较为稳定；若数据传输环境恶劣，终端在经历  $N_{\max}$  次数据传输失败后才返回休眠态，终端能量消耗较多而导致电池使用寿命持续减小。而  $N_{\max}$  在不同  $p_t$  下对  $D$ 、 $P_{\text{suc}}$  的影响与  $R_{\max}$  在不同  $\frac{m}{n}$  下对  $D$ 、 $P_{\text{suc}}$  的影响相类似，限于篇幅故不再重复描述和分析。

综合第 4.1 节~4.3 节可知，若终端长期处于并发用户数较少或临界饱和的环境（优良的数据传输环境）时， $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  对电池使用寿命、业务时延、业务成功率影响较小，但建议为  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  取较大值，以应对间歇性拥堵网络（间歇性恶劣数据传输环境）；若终端长期处于并发用户数过多的环境（恶劣的数据传输环境）中， $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  取值不宜过大，否则将在低业务成功率的情况下消耗过多不必要的能量。

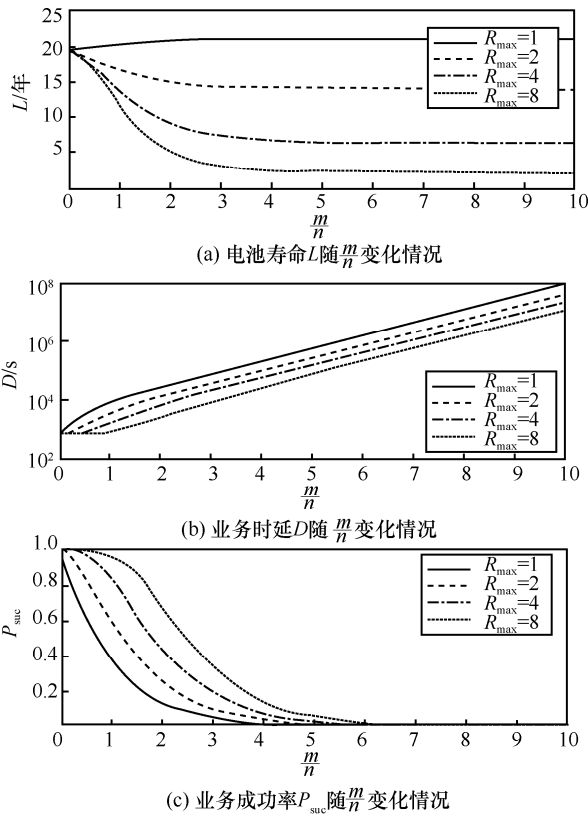


图 7 在不同  $R_{max}$  下,  $\frac{m}{n}$  对  $L$ 、 $D$ 、 $P_{suc}$  的影响 ( $N_{max}=8, p_t=0.5, T_p=1h$ )

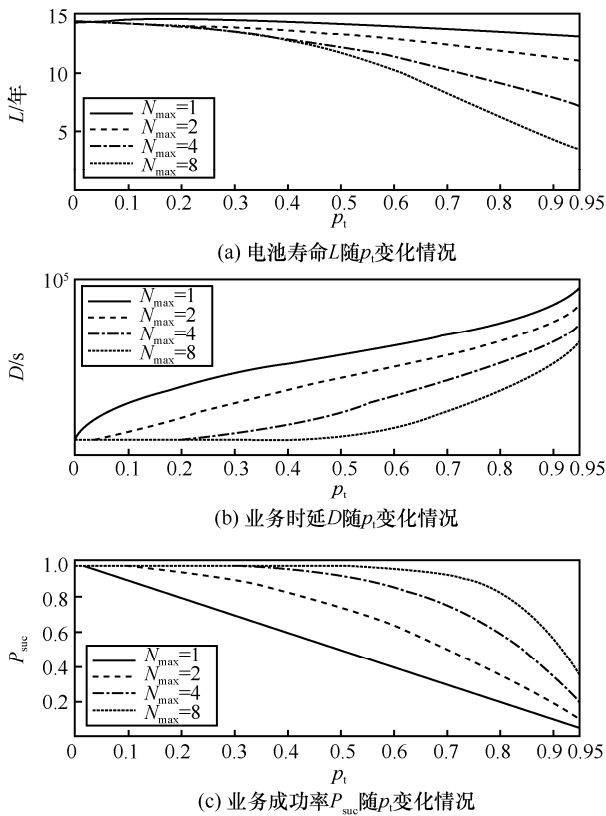


图 8 不同  $N_{max}$  下,  $p_t$  对  $L$ 、 $D$  与  $P_{suc}$  的影响 ( $R_{max}=8, \frac{m}{n}=1.0, T_p=1h$ )

#### 4.4 $R_{max}$ 、 $N_{max}$ 优化结果分析

由第 4.1 节~4.3 节可知, 在不同  $\frac{m}{n}$  和  $p_t$  下,  $R_{max}$ 、 $N_{max}$  的配置将对  $L$ 、 $D$ 、 $P_{suc}$  产生较大的影响。因此, 本节将根据式(14)给出不同  $\frac{m}{n}$  和  $p_t$  下  $R_{max}$ 、 $N_{max}$  的最优配置以及与之对应的  $L$ 、 $D$ 、 $P_{suc}$  的变化情况。为更好地观测  $L$ 、 $D$ 、 $P_{suc}$  之间的折中关系, 本节中忽略了式(14)的限制条件“ $L \geq 10$  年”。表 3 给出了  $(\frac{m}{n}, p_t) = \{(0.5, 0.1), (1.0, 0.5), (2.0, 0.8)\}$ ,  $T_p = \{0.1 h, 0.5 h, 1.0 h\}$  所得的优化配置结果, 其中,  $(\frac{m}{n}, p_t) = \{(0.5, 0.1), (1.0, 0.5), (2.0, 0.8)\}$  分别对应 {优良, 中等, 极差} 的业务环境, 上标\*表示对应参数的最优配置, 加粗数据为电池使用寿命未达到 10 年的数据。

由于各项参数配置结果的维度过多, 限于篇幅限制, 现以表 3 中第 5~9 号数据为例进行分析。该 5 组数据中, 变量  $\frac{m}{n}$  与  $p_t$  取值相同。对比第 5、7、9 号这 3 组数据可知: 当  $P_{RACH, set}$  和  $P_{TR, set}$  相同时,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$ 、 $P_{suc}^*$  取值相同,  $L^*$ 、 $D^*$  则随  $T_p$  的增大而增加。对比第 5、6 号或第 7、8 号数据可知, 当  $T_p$  一定时, 当  $P_{RACH, set}$ 、 $P_{TR, set}$  减小,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$  随之减小,  $L^*$ 、 $D^*$  则随之增大。

综合表 3 中数据分布规律可知, 1) 当  $(\frac{m}{n}, p_t)$  固定时,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$ 、 $P_{suc}^*$  主要受  $P_{RACH, set}$ 、 $P_{TR, set}$  的影响: 若  $P_{RACH, set}$ 、 $P_{TR, set}$  不变,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$ 、 $P_{suc}^*$  也不变; 若  $P_{RACH, set}$ 、 $P_{TR, set}$  减小,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$  随之变小,  $L^*$ 、 $D^*$  增大。2) 当  $P_{RACH, set}$ 、 $P_{TR, set}$ 、 $T_p$  一定时,  $(\frac{m}{n}, p_t)$  越大,  $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$  越大。3)  $L^*$  和  $D^*$  随  $(\frac{m}{n}, p_t)$ 、 $T_p$ 、 $R_{max}^*$ 、 $N_{max}^*$  变化的结果与第 4.1 节~4.3 节的分析一致。这意味着, 终端长期处于并发用户数较多、数据传输环境不佳的应用场景中, 并对业务时延不敏感时, 可通过降低业务成功率要求, 使电池使用寿命达到 10 年。

#### 5 结束语

为实现 5 Wh 电池 10 年使用寿命的低能耗要求, 本文全面评估了引入 eDRX 和 PSM 机制后的 NB-IoT 能耗情况, 并完成了相应的优化设计。鉴于现有 DRX 功耗模型多针对 H2H 业务背景, 且没有

表3  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  优化结果

序号	参数取值					优化结果				
	$\frac{m}{n}$	$p_t$	$T_p/h$	$P_{RACH,set}$	$P_{TR,set}$	$R_{\max}^*$	$N_{\max}^*$	$L^*/年$	$D^*/s$	$P_{suc}^*$
1	0.5	0.1	0.1	0.95	0.95	4	2	<b>8.02</b>	12.57	96.63%
2	0.5	0.1	0.1	0.6	0.6	1	1	13.02	113.39	76.07%
3	0.5	0.1	0.5	0.95	0.95	4	2	18.88	62.84	96.63%
4	0.5	0.1	1	0.95	0.95	4	2	22.73	125.67	96.63%
5	1	0.5	0.1	0.95	0.95	7	5	<b>1.99</b>	27.25	92.97%
6	1	0.5	0.1	0.5	0.5	1	1	<b>8.58</b>	1 597.18	18.39%
7	1	0.5	0.5	0.95	0.95	7	5	<b>7.78</b>	136.17	92.97%
8	1	0.5	0.5	0.75	0.75	4	2	10.44	1 056.01	63.03%
9	1	0.5	1	0.95	0.95	7	5	12.24	272.31	92.97%
10	2	0.8	0.1	0.95	0.95	21	14	<b>0.22</b>	35.37	91.09%
11	2	0.8	0.1	0.13	0.2	1	1	<b>6.88</b>	12 944.00	2.707%
12	2	0.8	0.5	0.95	0.95	21	14	<b>1.07</b>	176.21	91.09%
13	2	0.8	0.5	0.25	0.35	2	2	10.35	180 11.00	9.085%
14	2	0.8	1	0.95	0.95	21	14	<b>2.07</b>	352.26	91.09%
15	2	0.8	1	0.35	0.35	3	2	11.60	6.86	12.73%

考虑海量用户并发入网产生的碰撞带来的额外能耗, 本文首先将连接态分为 RACH 和 Tx/Rx 这 2 个状态, 以细化因接入冲突带来的能耗; 然后, 通过详细分析不同业务场景下终端工作状态转移关系, 建立了 NB-IoT 3 种典型业务 (分别为 MAR-P、MAR-E 和 SUR) 驱动时以 NB-IoT 终端工作状态 (分别为 PSM 态、RACH 态、Tx/Rx 态及 idle 态) 为状态变量的马尔可夫模型, 运用该模型给出了 NB-IoT 3 种典型业务场景的功耗与时延模型; 最后, 鉴于 MAR-P 业务的发生频次远大于另外 2 种业务, 本文给出了 MAR-P 业务激励时的单次功耗、单次时延及电池使用寿命的计算方法, 并建立了以电池使用寿命最大化为目标的优化模型。数值仿真结果表明, 当 NB-IoT 承载 MAR-P 业务时, 传输周期  $T_p$ 、最大随机接入次数  $R_{\max}$ 、最大数据重传次数  $N_{\max}$ 、并发用户数与前导码数之比  $\frac{m}{n}$ 、网络传输质量  $p_t$  共同影响电池使用寿命、业务传输时延及业务成功率, 优化时需折中考虑各因变量; 可通过增加业务传输周期  $T_p$  或减小  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  延长电池使用寿命, 以满足电池使用寿命达到 10 年的要求, 但会增加业务时延或降低业务传输成功率; 在传输周期  $T_p$  固定的情况下, 可对  $R_{\max}$ 、 $N_{\max}$  进行优化以最大化电池寿命。上述研究可为 NB-IoT 终端行为建模及

其能耗或时延方面的评估和优化提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 解运洲. NB-IoT 技术详解与行业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. XIE Y Z. Technology and application for narrowband Internet of things[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 戴博, 袁弋非, 余媛芳. 窄带蜂窝物联网 (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, et al. NB-IoT standards and key technologies[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [3] 3GPP. TR 45.820, Rel.13, V.13.1.0, cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of things (CIoT)[S]. 2015.
- [4] 3GPP. TR 36.802, Rel.13, V.13.0.0, evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); NB-IOT; technical report for BS and UE radio transmission and reception [S]. 2016.
- [5] BONTU C S, ILLIDGE E. DRX mechanism for power saving in LTE[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(6):48-55.
- [6] YEH J H, CHEN J C, LEE C C. Comparative analysis of energy-saving techniques in 3GPP and 3GPP2 systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(1):432-448.
- [7] JIN S, QIAO D. Numerical analysis of the power saving in 3GPP LTE advanced wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4):1779-1785.
- [8] HUANG J, QIAN F, GERBER A, et al. A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks[C]// International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. ACM, 2012:225-238.
- [9] 3GPP. TS 22.368, Rel.14, V.14.0.1, service requirements for machine-type communications (MTC); Stage 1 [S]. 2017.

- [10] TIRRONEN T, LARMO A, SACHS J, et al. Machine-to-machine communication with long-term evolution with reduced device energy consumption[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013, 24(4):413-426.
- [11] KOC A T, JHA S C, VANNITHAMBY R, et al. Device power saving and latency optimization in LTE-A networks through DRX configuration[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5):2614-2625.
- [12] ZHOU K, NIKAEIN N, SPYROPOULOS T. LTE/LTE-A discontinuous reception modeling for machine type communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(1):102-105.
- [13] RAMAZANALI H, VINEL A. Performance evaluation of LTE/LTE-A DRX: a markovian approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(3):386-397.
- [14] RIMAL B P, VAN D P, MAIER M, et al. Machine-to-machine communications over FiWi enhanced LTE networks: a power-saving framework and end-to-end performance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4):1062-1071.
- [15] BALASUBRAMANYA N M, LAMPE L, VOS G, et al. DRX with quick sleeping: a novel mechanism for energy-efficient IoT using LTE/LTE-A[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(3):398-407.
- [16] CHANG C W, CHEN J C. Adjustable extended discontinuous reception cycle for idle-state users in LTE-A[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11):2288-2291.
- [17] ZHANG R, MOUNGLA H, YU J, et al. Medium access for concurrent traffic in wireless body area networks: protocol design and analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(3):1.
- [18] XU S, LIU Y, ZHANG W. Grouping based discontinuous reception for massive narrowband internet of things systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, PP(99):1.
- [19] 简鑫, 曾孝平, 谭晓衡, 等. 改进的多信道 S-ALOHA 暂态性能分析方法及其应用[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8):1894-1900.  
JIAN X, ZENG X P, TAN X H, et al. Improved transient performance analysis algorithm of multichannel S-ALOHA and its applications[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(8): 1894-1900.
- [20] 陆传赓. 排队论(第2版)[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.  
LU C B. Queuing theory (second edition)[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009.

## [作者简介]



简鑫(1987-), 男, 四川自贡人, 博士, 重庆大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为应用统计数学、物联网无线接入技术及应用等。



韦一笑(1993-), 女, 广西河池人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为窄带物联网、物联网超低功耗技术等。



刘钰琴(1991-), 女, 四川南充人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为窄带物联网、群智感知技术等。

宋健(1995-), 男, 江西宜春人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为智慧网络、群体智能等。

曾孝平(1956-), 男, 四川广安人, 博士, 重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为航空移动通信、下一代移动通信、生物信号处理等。

谭晓衡(1976-), 男, 重庆人, 博士, 重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代移动通信、通信信号处理等。