

窄带物联网覆盖类别更新机制性能分析与优化

简鑫, 刘钰芬, 韦一笑, 宋健, 王芳, 付澍, 谭晓衡

(重庆大学微电子通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 以覆盖类别为状态变量建立了窄带物联网 (NB-IoT, narrow-band internet of things) 覆盖类别更新机制的马尔可夫链模型, 给出了平均接入失败概率和平均功耗的优化模型及求解办法, 分析了前导码重复次数、系统负载、全局最大传输次数对各覆盖类别最大传输次数最优取值的影响。数值分析表明: 常规覆盖类别和扩展环境覆盖类别的最大传输次数对系统性能影响较大, 最大传输次数取值范围应分别控制在 $[1,5]$ 和 $[1,7]$ 之间; 极端环境覆盖类别的最大传输次数对系统性能影响不大, 可取 $[1,10]$ 之间的任意值, 建议取值为 1; 所提的引入覆盖类别回退机制的覆盖类别更新机制的平均功耗比协议模型低约 95%。

关键词: 窄带物联网; 随机接入; 覆盖增强; 覆盖类别; 马尔可夫链

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018228

Performance analysis and optimization for coverage classes updating mechanism of narrow-band internet of things

JIAN Xin, LIU Yuqin, WEI Yixiao, SONG Jian, WANG Fang, FU Shu, TAN Xiaoheng

College of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: A Markov chain model with coverage classes as state variables was established to describe the dynamics of the coverage classes updating mechanism of narrow-band internet of things (NB-IoT). An optimization model to minimize average probability of access failure as well as average power consumption was formulated, with which the effects of preamble repetition number, system load and global maximum transmission number on the optimal configuration of maximum transmission number of each coverage class was analyzed. Numerical analysis results show that the maximum transmission number of normal coverage and extended coverage have a great influence on the system performance and their value ranges should be set within $[1,5]$ and $[1,7]$ respectively. However, the maximum transmission number of extreme coverage has little influence on the system performance, its value could be any one in $[1,10]$ but the recommended value is 1. In addition, the average power consumption of the model that introduced coverage classes' rollback mechanism is about 95% lower than the model proposed by 3GPP.

Key words: NB-IoT, random access, coverage enhancement, coverage classes, Markov chain

1 引言

窄带物联网 (NB-IoT, narrow-band internet of

things) 是 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) 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

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501065, No.61571069, No.61601067, No.61701054); 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.106112017CDJQJ168817, No.2018CDXYTX0009, No.2018CDYJJSY0055)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501065, No.61571069, No.61601067, No.61701054), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (No. cstc2016jcyjA0021), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.106112017CDJQJ168817, No.2018CDXYTX0009, No.2018CDYJJSY0055)

(LPWA, low power wide area) 技术^[1-4], 面临海量连接、超低功耗、广域覆盖与深度覆盖、信令与数据相互触发等技术挑战^[5-8]。为满足 NB-IoT 广域覆盖(如 10~30 km 覆盖半径)与深度覆盖(如 20 dB 穿透损耗)的需求, 3GPP 提出一种特殊的链路自适应技术, 即终端根据所处信道环境确定其所属覆盖类别(CC, coverage classes)并实现与之对应的覆盖增强机制(CE, coverage enhancement), 如不同重复次数和发射功率等^[9]。

覆盖类别是 3GPP 为 NB-IoT 引入的新概念, 主要是考虑到当 NB-IoT 基站的覆盖半径较大或 NB-IoT 终端被部署在信道不理想的工作环境时(如车库、地下室等), 所有终端采取相同的覆盖策略将导致处于不理想工作环境中的终端性能急剧下降, 因此为不同覆盖类别采取合适的覆盖策略有望提高系统接入成功概率、降低系统功耗、提升系统整体性能。根据最大耦合损耗(MCL, maximum coupling loss), NB-IoT 定义了如下 3 个覆盖类别。1) 常规覆盖(normal coverage): $MCL < 144$ dB, 与 GPRS 现有覆盖范围一致。2) 扩展覆盖(extended coverage): $144 \text{ dB} < MCL < 154$ dB, 在 GPRS (general packet radio service) 现有覆盖范围的基础上提升了 10 dB。3) 极端覆盖(extreme coverage): $MCL > 154$ dB, 在 GPRS 现有覆盖范围的基础上提升了 20 dB^[10]。NB-IoT 覆盖增强机制的基本思想则是以更多的发送功率换取更高的接入成功概率, 即为处于较差信道环境中的 NB-IoT 终端分配更多的传输次数以累积更多的发射功率。

目前, 针对 NB-IoT 的理论研究才刚刚起步, 现有文献大多采用实测或仿真的方式给出 NB-IoT 的性能评估, 因场景不统一导致结果差异很大, 而针对 NB-IoT 优化设计方面的研究就更少了^[11-21]。针对 NB-IoT 覆盖增强机制, 有限的研究局限于基于最大耦合路损的静态分析。文献[15-19]对运营商部署的 NB-IoT 网络的覆盖性能进行了实地测试并给出了组网方式的建议, 其中文献[19]给出了前导码重复次数的配置建议; 文献[20]将现有商用 LTE (long term evolution) 网络升级配置为 LTE-M (LTE-machine to machine) 和 NB-IoT 网络, 实地测量了两种技术在农村地区的覆盖性能和容量性能; 文献[21]则基于典型的都市信道传播模型, 仿真分析了 NB-IoT 主要物理信道的覆盖性能; 文献[22]提出了一种具有确定传输次数的上行链路自适应

方案, 以保证传输可靠性和提高 NB-IoT 系统的吞吐量。上述研究工作因没有融入 NB-IoT 覆盖类别更新过程使得很难有效地刻画 NB-IoT 覆盖增强机制的动态工作过程。因为当信道环境发生变化或连续接入成功/失败次数达到当前覆盖类别规定的次数时, NB-IoT 均需动态调整其所属的覆盖类别。更为遗憾的是 3GPP 也没有明确给出 NB-IoT 覆盖类别的更新机制, 即如何确定各覆盖类别间切换的转移条件。针对上述问题, 本文首先将 NB-IoT 覆盖类别的更新过程建立以覆盖类别为状态变量的马尔科夫过程模型, 建立了不同覆盖类别间的转移概率矩阵, 并求取了各状态的稳态概率; 然后, 以最小化接入失败概率和功耗为目标函数, 开展了 NB-IoT 覆盖类别更新机制的最优配置策略研究, 建立了一套具有实践指导意义的 NB-IoT 覆盖类别更新机制。上述研究内容完善了 NB-IoT 覆盖类别更新机制的理论分析过程, 可为 NB-IoT 蓄势待发的商用化进程提供有力的技术支撑。

2 NB-IoT 上行随机接入过程

如图 1 所示, NB-IoT 终端须在下行同步后确定初始覆盖类别, 并在随机接入时更新其所属覆盖类别, 一旦随机接入成功, 后续的数据传输即可进行针对性的覆盖增强。因此 NB-IoT 覆盖类别更新过程的研究应重点关注 NB-IoT 终端的随机接入过程。鉴于大多数 NB-IoT 业务的触发周期较长且具有时延不敏感性, NB-IoT 终端目前只支持基于竞争的随机接入, 并采用与 LTE 类似的 4 个步骤, 但每个步骤均针对 NB-IoT 业务特性进行了优化设计, 两者随机接入信道参数的主要区别如表 1 所示^[23]。

表 1 NB-IoT 与 LTE 随机接入信道参数对比

随机接入参数	LTE	NB-IoT
带宽	1 080 kHz	180 kHz
子载波间隔	15 kHz	3.75 kHz/15 kHz
时隙长度	0.5 ms	2 ms/0.5 ms
接入方式	竞争/非竞争	竞争
前导码序列	Zadoff-Chu 序列	辅以跳频的全 1 序列
前导码重复次数	1	{1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128}
全局最大传输次数	$N \in [1, 3 \sim 200]$	$N \in [1, 3 \sim 200], N_{i, \max} \in [1, 10]$
RA 响应窗最大长度	10 ms	10 240 ms

与 LTE 协议相比, 3GPP 协议规定的 NB-IoT 随机接入过程可概述为^[24]以下内容。

1) 传输随机接入前导 (Msg1)。终端测量下行参考信号接收功率 (RSRP, reference signal receiving power) 的平均值并判决其初始覆盖类别^[25], 选择与当前覆盖类别匹配的 NB-PRACH (NB-physical random access channel) 资源 (如子载波序号、前导码重复次数与发送功率等), 发送辅以单音跳频技术 (single-tone frequency hopping) 的全 1 序列作为前导序列发起随机接入。

2) 传输随机接入响应 (Msg2)。终端发送前导码后需要在特定的时间窗内接收随机接入响应 (RAR, random access response), RAR 包含定时偏移量、C-RNTI (cell radio network temporary identifier) 和 Msg3 调度信息等内容。如果终端在 RAR 响应窗内没有接收到正确的 RAR 响应, 前导码全局传输次数计数器 N 加 1, 新增的用于统计终端在当前覆盖类别下的前导码传输次数的计数器 N_i (preamble_transmission_counter_CE) 也加 1, 当该计数器达到最大值时终端将切换至下一覆盖类别继续发送 Msg1。如果当前已是最大覆盖类别, 则停留在当前覆盖类别继续发送 Msg1。每个覆盖类别的前导码传输次数 N_i 不能超过 $N_{i,max}$, 前导码全局传输次数计数器 N (preamble_transmission_counter) 仍然作为一个总的计数器用于判定整个随机接入过程是否失败。

3) 传输 MAC (media access control) 子层或 RRC (radio resource control) 子层消息 (Msg3)。终端接收到 RAR 消息, 获得上行时间同步和上行资源, 但此时并不能确定 RAR 消息是发送给自己还是发送给其他终端, 因此需向基站发送 Msg3 进行 RRC 连接请求, 该请求包含待传数据量和功率量冗余等信息。终端发送 Msg3 后立即启动竞争解决定时器, 等待 Msg4。

4) 竞争解决 (Msg4)。基站收到 Msg3 后需进行竞争解决并将结果发送给终端。如果竞争解决失败, 将对前导码全局传输次数计数器 N 加 1 并重新发送 Msg1。若竞争解决成功, 终端开始进行数据传输。

上述过程与 LTE 协议随机接入过程的主要区别在于覆盖类别及其调整策略的引入, 也即为本文的重点研究内容, 如图 1 虚线部分所示。文中的计算式参数较多, 各参数说明及表示符号如表 2~表 4 所示。

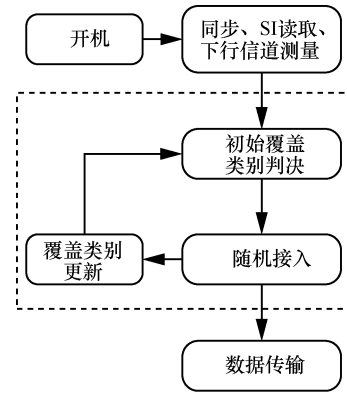


图 1 带覆盖增强机制的 NB-IoT 上行数据传输过程

表 2 系统参数及表示符号

参数说明	符号
第 i 个覆盖类别	C_i
第 i 个覆盖类别的前导码传输次数计数器	N_i
第 i 个覆盖类别的前导码最大传输次数	$N_{i,max}$
前导码的全局最大传输次数	N

表 3 覆盖类别更新模型参数及表示符号

参数说明	符号
第 i 个覆盖类别的前导码最大传输失败次数	$N_{f,i}$
第 i 个覆盖类别的前导码最大传输成功次数	$N_{s,i}$
终端在第 i 个覆盖类别的单次接入失败概率	$P_{f,i}$
前导码冲突概率	P_f
小区内随机接入用户数	M
可用前导码数	n
前导码多次重复累计功率后带来的接入失败概率减少量	P_G
前导码重复次数	R_i
终端在第 i 个覆盖类别接入成功后选择第 j 覆盖类别作为当前覆盖类别的概率	β_{ij}
第 i 个覆盖类别的稳态概率	q_i

表 4 优化设计模型参数及表示符号

参数说明	符号
终端在第 i 个覆盖类别的接入失败概率	P_i
系统平均接入失败概率	P_c
终端发送一次前导码所需的功耗	E_0
终端在第 i 个覆盖类别的功耗	E_i
系统平均功耗	E
3 个覆盖类别的前导码最大传输次数之和	N_{Σ}
第 i 层目标函数的记号	L_i
系统负载	t
终端进行一次信道测量所需功耗	E_m

3 覆盖类别更新机制的建模

3.1 由 3GPP 协议抽象的更新模型

由第 2 节可知, NB-IoT 终端连续接入失败次数达到 $N_{f,i}$ 时将切换至下一覆盖类别; 若终端在 $N_{f,i}$ 次以内随机接入成功, 则可开始数据传输, 并在下一次发起随机接入时重新判别初始覆盖类别。然而 NB-IoT 终端在选择初始覆盖类别时因信道的变化可能导致误判, 故初始覆盖类别可能为 3 个覆盖类别中的任意一个, 且 3 个覆盖类别成为初始覆盖类别的概率之和为 1。若 NB-IoT 终端处于最大覆盖类别, 超过当前覆盖类别的最大传输次数后可继续发送前导码, 此时无论接入是否成功, NB-IoT 终端将停留在最大覆盖类别。若已知终端在某一时刻 T_0 所处覆盖类别, NB-IoT 终端在 $T > T_0$ 时所处覆盖类别只与 T_0 时刻有关, 而与 T_0

之前的状态无关, 即满足马尔可夫性(无后效性), 因此本文将 NB-IoT 覆盖类别更新机制建立如图 2 所示的马尔可夫过程, 其中 $C_i (i=1,2,3)$ 代表 3 个覆盖类别, 实线箭头代表状态转移的方向, $P_{ij} (i, j=1,2,3)$ 为覆盖类别之间的转移概率, 状态转移概率矩阵可表示为

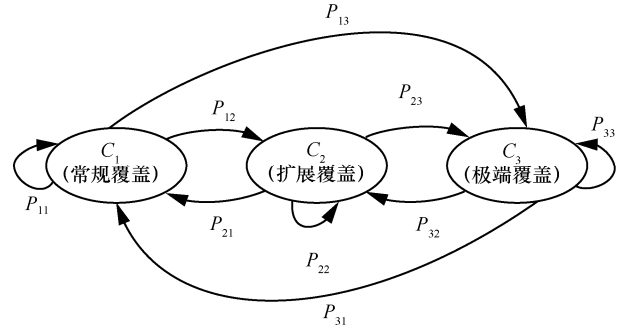


图 2 NB-IoT 覆盖类别更新过程的马尔可夫模型

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} (1 - P_{f,1}^{N_{f,1}})\beta_{11} & P_{f,1}^{N_{f,1}} + (1 - P_{f,1}^{N_{f,1}})\beta_{12} & (1 - P_{f,1}^{N_{f,1}})\beta_{13} \\ (1 - P_{f,2}^{N_{f,2}})\beta_{21} & (1 - P_{f,2}^{N_{f,2}})\beta_{22} & P_{f,2}^{N_{f,2}} + (1 - P_{f,2}^{N_{f,2}})\beta_{23} \\ (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}})\beta_{31} & (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}})\beta_{32} & P_{f,3}^{N_{f,3}} + (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}})\beta_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $P_{f,i} = P_f P_g = (1 - e^{-\frac{M}{n}}) e^{-R_i}$ 为终端在 C_i 的单次接入失败概率; $P_f = 1 - e^{-\frac{M}{n}}$ 表示前导码冲突概率, M 和 n 分别表示随机接入用户数和可用前导码数; $P_g = e^{-R_i}$ 表示考虑捕获效应或接收机接收灵敏度时因前导码多次重复累计功率后带来的接入失败概率减少量, R_i 为前导码重复次数。 $N_{f,i}$ 为 C_i 的最大传输失败次数, β_{ij} 为在 C_i 随机接入成功后选择 C_j 作为覆盖类别的概率, 且 $\sum_{j=1}^3 \beta_{ij} = 1 (i=1,2,3)$ 。

值得注意的是式(1)中的 P_{12} 、 P_{23} 、 P_{33} 等于连续失败 N_1 、 N_2 、 N_3 次的概率与接入成功后选择 C_1 、 C_2 、 C_3 为初始覆盖类别的概率之和, 其余 P_{ij} 等于接入成功后选择 C_j 作为初始覆盖类别的概率, 即该模型完整描述了终端根据信道测量结果重新选择初始覆盖类别发起随机接入的过程。为简化分析, 本文选择 $\beta_{ii} = x$, $\beta_{ij} = \frac{1-x}{2}$ 这种情况, 以 x 衡量信道环境的监测性能, 且设误判为其他类别的概率相等。由式(1)可得各状态的稳态概率如式(2)所示。

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{\omega} (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}}) (1-x) (-P_{f,2}^{N_{f,2}} - 3x + 3P_{f,2}^{N_{f,2}} x + 3) \\ q_2 = \frac{1}{\omega} (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}}) (1-x) (-P_{f,1}^{N_{f,1}} - 3x + 3P_{f,1}^{N_{f,1}} x + 3) \\ q_3 = \frac{1}{\omega} [3(1 - P_{f,1}^{N_{f,1}})(1 - P_{f,2}^{N_{f,2}})x^2 - (4P_{f,1}^{N_{f,1}} + 2P_{f,2}^{N_{f,2}}) \\ -6x - P_{f,1}^{N_{f,1}} + P_{f,2}^{N_{f,2}} + P_{f,1}^{N_{f,1}} P_{f,2}^{N_{f,2}} + 3] \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \omega = & 3(1 - P_{f,2}^{N_{f,2}}) [2(1 - P_{f,1}^{N_{f,1}}) + (1 - P_{f,3}^{N_{f,3}})] x^2 + 6(1 - P_{f,3}^{N_{f,3}}) x \\ & - 2[(3 - P_{f,3}^{N_{f,3}})(1 - P_{f,1}^{N_{f,1}}) + (3 - 2P_{f,3}^{N_{f,3}})(1 - P_{f,2}^{N_{f,2}})] x \\ & - 6P_{f,3}^{N_{f,3}} + P_{f,1}^{N_{f,1}} P_{f,2}^{N_{f,2}} + P_{f,2}^{N_{f,2}} P_{f,3}^{N_{f,3}} - P_{f,1}^{N_{f,1}} P_{f,3}^{N_{f,3}} + 9 \end{aligned}$$

稳态概率可表示系统趋于稳态时处于各覆盖类别的终端比例, 改变影响 q_i 的参数配置可对该比例进行调整。由式(2)可知, q_1 、 q_2 随 x 增加而减小, q_3 随 x 增加而增加; 当 $x \rightarrow 1$ 时, 式(1)描述的随机过程将退化为具有一个吸收态 C_3 的马尔可夫过程, 其状态转移概率矩阵为

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 - P_{f,1}^{N_{f,1}} & P_{f,1}^{N_{f,1}} & 0 \\ 0 & 1 - P_{f,2}^{N_{f,2}} & P_{f,2}^{N_{f,2}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对应的稳态概率为 $q_1=q_2=0, q_3=1$ 。一般情况下, 终端在 C_i 随机接入成功后再次选择 C_i 为初始覆盖类别的概率 x 较大, 故系统稳态时处于 C_3 的终端比例较大, 这必然导致系统平均功耗较大。分析式(2)可知, 在 x 较大时增加 $N_{f,i}$ 可以一定程度减小 q_3 , 但随之带来的功耗增加使得系统平均功耗很难降低。本质上是因为未引入覆盖类别回退机制, 终端一旦进入高覆盖类别便很难回退至低覆盖类别。

3.2 引入回退机制的更新模型

由 3.1 节的分析可知, 为了实现 NB-IoT 低功耗的目标, 为 NB-IoT 覆盖类别更新过程引入回退机制是十分必要的。且当信道环境较为稳定时, 例如水电气表、家电等 NB-IoT 终端的位置长期固定, 可认为其信道环境在较长时间范围内保持不变, 此时每一次随机接入都进行初始覆盖类别判别会带来额外的功耗和信令开销。因此本文建议为 NB-IoT 覆盖类别更新机制引入一个寄存器, 以记录终端每一次随机接入成功/失败时所处的覆盖类别, 下一次随机接入时终端就以寄存器记录的覆盖类别作为初始覆盖类别进行随机接入。这样 NB-IoT 终端投入使用后只需要在首次发起随机接入时以测量 RSRP 的方式获取初始覆盖类别, 而信道环境的变化仍可通过连续多次随机接入成功与否来反应。若终端在 C_i 连续接入成功 $N_{s,i}$ 次/失败 $N_{f,i}$ 次($i=1,2,3$), 则降低/升高覆盖类别。限定覆盖类别只能在相邻覆盖类别间转移, 上述过程的转移概率矩阵可表示为

$$P = [P_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 - P_{f,1}^{N_{f,1}} & P_{f,1}^{N_{f,1}} & 0 \\ (1 - P_{f,2})^{N_{s,2}} & 1 - (1 - P_{f,2})^{N_{s,2}} - P_{f,2}^{N_{f,2}} & P_{f,2}^{N_{f,2}} \\ 0 & (1 - P_{f,3})^{N_{s,3}} & 1 - (1 - P_{f,3})^{N_{s,3}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以看出, 式(4)仅与 $N_{s,i}$ 、 $N_{f,i}$ 、 $P_{f,i}$ 有关, 覆盖类别更新机制就是要给出不同系统参数下 $N_{s,i}$ 与 $N_{f,i}$ 的最佳配置策略。为简化分析, 本文仅考虑 $N_{s,i} = N_{f,i} = N_{i,max}$ 的情况。此时由式(4)可得各状态的稳态概率为

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{\omega} \left(1 - \left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_3} \right)^{N_{3,max}} \left(1 - \left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_2} \right)^{N_{2,max}} = \frac{1}{\omega} P_{32} P_{21} \\ q_2 = \frac{1}{\omega} \left(\left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_1} \right)^{N_{1,max}} \left(1 - \left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_3} \right)^{N_{3,max}} = \frac{1}{\omega} P_{12} P_{32} \\ q_3 = \frac{1}{\omega} \left(\left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_1} \right)^{N_{1,max}} \left(\left(1 - e^{-\frac{M}{n}} \right) e^{-R_2} \right)^{N_{2,max}} = \frac{1}{\omega} P_{12} P_{23} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\omega = P_{32} P_{21} + P_{12} P_{32} + P_{12} P_{23}$ 。

式(5)明显体现出状态转移规律与稳态概率的关系。状态 1 的稳态概率由状态 3 到状态 2 的转移概率 P_{32} 和状态 2 到状态 1 的转移概率 P_{21} 决定, 即其他状态转移到状态 1 的路径有“状态 2→状态 1”和“状态 3→状态 2→状态 1”。同理, 状态 2 的稳态概率由 P_{12} 和 P_{32} 决定, 状态 3 的稳态概率由 P_{12} 和 P_{23} 决定。上述状态转移规律和图 2 与式(3)描述的覆盖类别更新机制完全符合。由式(5)可知, q_i 正比于 $N_{i,max}$, 但由于 $P_{f,i}$ 较小, 随着 $N_{i,max}$ 的增加 P_{ij} ($i < j$) 快速收敛于 0, 据此推导可得: 1) $N_{1,max}$ 足够大时 q_1 收敛于 1, q_2 、 q_3 收敛于 0, 且收敛速度快; 2) $N_{2,max}$ 足够大时 q_2 收敛于 1, q_1 、 q_3 收敛于 0, 收敛速度较快; 3) 随着 $N_{3,max}$ 的增加, q_3 增加而 q_1 、 q_2 降低, 收敛速度慢。上述现象为第 4 节中的覆盖类别更新机制优化设计及模型求解提供了理论依据。

4 覆盖类别更新机制的优化设计

4.1 覆盖类别更新机制的优化模型

NB-IoT 随机接入过程以增加前导码传输和重复次数的方式降低接入失败概率, 即以增加功耗和时延的方式换取覆盖增强。然而 NB-IoT 终端一般采用电池供电, 为了实现 5 Wh 电池长达 10 年寿命的目标, 需要在满足一定接入失败概率的条件下尽可能减小系统功耗。因此, 如何配置 NB-IoT 各覆盖类别的前导码最大传输次数 $N_{s,i}$ 与 $N_{f,i}$, 使终端的平均接入失败概率和平均功耗尽可能最小是本文关注的重点问题。考虑到 NB-IoT 终端低移动性的特点, 本文仅给出式(4)所述模型的优化模型及求解办法。

首先, 确定各覆盖类别的接入失败概率和功耗。设 N 为前导码全局最大传输次数, 各覆盖类别的接入失败概率 P_i 可表示为

$$\begin{cases} P_1 = (P_{f,1})^{N_{1,max}} \\ P_2 = (P_{f,2})^{N_{2,max}} \\ P_3 = (P_{f,3})^{N - N_{1,max} - N_{2,max}} \end{cases} \quad (6)$$

设 E_0 为发送一次前导码所需的功耗, 各覆盖类别的功耗 E_i 可表示为

$$\begin{cases} E_1 = R_1 N_{1,max} E_0 \\ E_2 = R_2 N_{2,max} E_0 \\ E_3 = R_3 (N - N_{1,max} - N_{2,max}) E_0 \end{cases} \quad (7)$$

接下来, 利用各覆盖类别的稳态概率加权各覆盖类别的接入失败概率和功耗, 可得 NB-IoT 终端随机接入过程的平均接入失败概率 P_c 和平均功耗 E , 分别表示为

$$P_c = \sum_{i=1}^3 q_i P_i \quad (8)$$

$$E = \sum_{i=1}^3 q_i E_i \quad (9)$$

最后, 以 $N_{i,\max}$ 为变量, P_c 和 E 为第一优先层次的目标函数, 引入 $N_\Sigma = \sum_{i=1}^3 N_{i,\max}$ 作为第二优先层次的目标函数, 建立分层多目标非线性整数规划模型为

$$\begin{aligned} & \min (L_1(P_c, E), L_2(N_\Sigma)) \\ & \text{约束条件为} \\ & \begin{cases} 0 < \sum_{i=1}^3 N_{i,\max} \leq N \\ N_{i,\max} \text{ 为整数, } i \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $L_i (i=1,2)$ 是优先层次的记号, 由于 $N_{i,\max}$ 只能取整数, Matlab 计算精度的限制可能导致最优解不唯一, 因此使 N_Σ 最小可以保证解的最优性。在约束条件下, 先求第 1 层多目标极小化的有效解集, 然后在第 1 层问题的有效解集上对第 2 层问题进行求解^[26]。由式(5)~式(10)可知, 影响变量 $N_{i,\max}$ 取值的因素有系统负载 $t = \frac{M}{n}$, 即用户数与可用前导码

数的比值; 前导码单次发送功耗 E_0 , 其固定为 $3.56 \times 10^{-7} \text{ Wh}$ ^[23,27]; 前导码重复次数 R_i 和全局最大传输次数 N , 两者取值范围由表 1 确定。

至此, 本文已建立 NB-IoT 覆盖类别更新机制的性能分析模型与最优参数配置方法, 若增加终端单次信道测量的功耗 E_m , 上述方法还可推广至式(1)所述的模型。

4.2 优化模型的求解

式(10)中第一层为复杂度极高的多目标非线性整数规划, 也是求解的重难点, 第二层为简单的线性规划。针对第一层这类优化问题, 研究者多采用遗传算法、模拟退火算法等智能优化算法求解^[28-30]。然而智能优化算法实现比较复杂、优化结果对初始值较为敏感, 并不是解决本文最优化模型的最佳选择。本文在剖析了式(10)第一层

目标函数的主要特征后提出一种结合约束法和穷举搜索法的算法^[31], 该算法简单高效且优化结果稳定。

首先, 观察 P_c 和 E 对 $N_{i,\max}$ 的偏导, 因表达式过长本文暂不列出, 结合第 3 节稳态概率变化规律可知: 1) P_c 随着 $N_{i,\max}$ 的增加一直减小; 2) E 随着 $N_{1,\max}$ 、 $N_{2,\max}$ 的增加先减小再增加, 而随着 $N_{3,\max}$ 的增加一直增加。以 $t=1$ 、 $\{R_1, R_2, R_3\} = \{1, 2, 4\}$ 、 $N=200$ 为例, P_c 和 E 对 $N_{i,\max}$ 的一阶偏导数可表示为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P_c}{\partial N_{1,\max}} < \frac{\partial P_c}{\partial N_{2,\max}} < \frac{\partial P_c}{\partial N_{3,\max}} < 0 \quad (11) \\ & \begin{cases} \frac{\partial E}{\partial N_{2,\max}} < \frac{\partial E}{\partial N_{1,\max}} < 0 < \frac{\partial E}{\partial N_{3,\max}}, 0 < N_{i,\max} \leq 3 \\ 0 < \frac{\partial E}{\partial N_{3,\max}} < \frac{\partial E}{\partial N_{1,\max}} < \frac{\partial E}{\partial N_{2,\max}}, N_{i,\max} > 3, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (12) \end{aligned}$$

由式(11)和式(12)知: 1) P_c 对 $N_{i,\max}$ 的偏导数均小于 0, 即 P_c 随 $N_{i,\max}$ 增加一直减小且 $N_{1,\max}$ 增加时 P_c 减小速度最快; 2) $N_{1,\max}=1$ 时 $P_{12}=P_{f,1}$, 这意味着终端在 C_1 发起首次随机接入且接入失败时, 终端将直接切换至 C_2 , 而在 C_2 、 C_3 进行随机接入的功耗更大, 因此平均功耗 E 较大; $N_{1,\max}<3$ 时, 随着 $N_{1,\max}$ 增加, P_{12} 呈指数减小, 故 E 减小; $N_{1,\max}>3$ 时, $(P_{f,1})^{N_{1,\max}}$ 逐渐趋于 0, E 正比于 $N_{1,\max}$; 以此类推, 也可以看出 E 随 $N_{i,\max}$ ($i=2,3$) 的变化规律。

图 3 进一步给出了当 $t=1$ 、 $\{R_1, R_2, R_3\} = \{1, 2, 4\}$ 、 $N=200$ 时 P_c 和 E 随 $N_{i,\max}$ 的变化规律。结合式(11)~式(12)可知, 1) 存在使 P_c 和 E 都较高的 $N_{i,\max}$ 配置集合, 该集合元素具有以下特点: $N_{1,\max}=1$, 或 $N_{1,\max}=2$ 且 $N_{2,\max} \in [1, 20]$, 这些配置是需要避免的, 不是最优解需要考虑的范围; 2) 式(10)第一层不存在使 P_c 和 E 两者都最小的最优解, 但存在两者之间的平衡点, 即满足 P_c 小于某个阈值 P_{th} 的情况下得到 E 的单目标最优解。

根据上述特点, 本文采用约束法和穷举搜索法求解式(10)所述分层多目标非线性整数规划, 求解步骤如下。

- 1) 第一层, 采用约束法将 P_c 转化为约束条件, 得到新的单目标非线性整数规划模型, 即式(13)。
- 2) 计算可行解集 $D = \{N_{i,\max} | 0 \leq P_c \leq P_{th},$

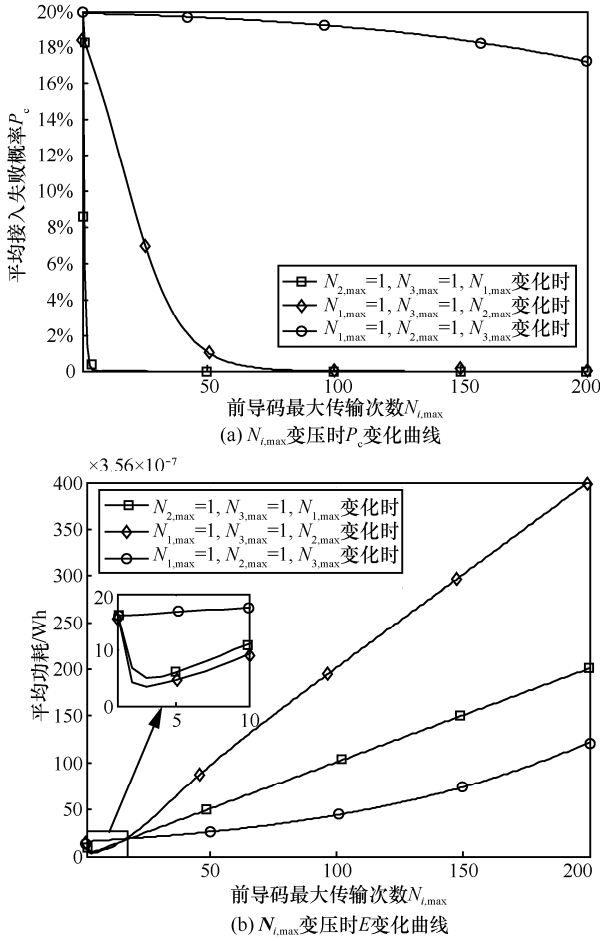


图 3 $N_{i,max}$ 变化时的 P_c 和 E 变化曲线

$0 \leq \sum_{i=1}^3 N_{i,max} \leq N, N_{i,max}$ 为整数}, 其中变量矩阵

$N_{i,max} = [N_{1,max}, N_{2,max}, N_{3,max}]$, 任取一个可行解 $N_{i,max}^{(0)}$ 作为初值, 令 $k \leftarrow 0$.

3) 计算 $E(N_{i,max}^{(k)})$, 令 $\min E \leftarrow E(N_{i,max}^{(k)})$;

4) 若 $E(N_{i,max}^{(k+1)}) \leq E(N_{i,max}^{(k)})$, 则 $\min E \leftarrow E(N_{i,max}^{(k+1)})$;

5) 依次迭代直到遍历 D , 得到式(11)第 1 层的有效解集, 即 $\min E$ 对应的 $N_{i,max}$ 集合。

6) 第 2 层, 计算 $N_{i,max}$ 集合元素的 N_{Σ} , 得到最终的有效解即 $\min N_{\Sigma}$ 对应的 $N_{i,max}$ 。

$$\min E = \sum_{i=1}^3 q_i E_i \quad (13)$$

约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_c \leq P_{th} \\ 0 < \sum_{i=1}^3 N_{i,max} \leq N \\ N_{i,max} \text{ 为整数, } i \in \{1, 2, 3\} \end{cases}$$

至此, 本文已给出式(10)所述分层多目标非线性整数规划的优化求解办法。

5 数值分析

本节基于 4.2 节的优化算法, 研究参数 R_i, t 和 N 对系统 $N_{i,max}$ 最优取值与对应 P_c 和 E 的影响, 以及由 3GPP 协议抽象的模型与引入回退机制的模型的对比。根据爱立信公司最新发布的 NB-IoT 覆盖性能测试报告, 处于极端室内环境的 NB-IoT 终端在 800 MHz 带宽时接入失败概率仅为 0.01, 因此本文设置阈值 $P_{th} = 0.01$; 前导码单次发送功耗 $E_0 = 3.56 \times 10^{-7} \text{Wh}$ 。

5.1 R_i 与 $N_{i,max}$ 最优取值及 P_c 和 E 关系

令 $t = 1, N = 200$, $R_{i,set}$ 为 R_i 可取配置集的下标集合, 本节分析的 R_i 配置集为从表 1 所示 R_i 的 8 种配置中取 3 种分别作为 $R_i (i=1, 2, 3)$ 配置的所有组合, 且考虑各覆盖类别的覆盖增强效果需有差异, $R_{i,set}$ 每个组合满足 $R_1 < R_2 < R_3$ 。图 4(a) 描述了 $R_{i,set}$ 中每个下标对应的组合, 如 $R_{i,set} = 1$ 对应的组合为 $\{R_1, R_2, R_3\} = \{1, 2, 4\}$; 图 4(b)~图 4(c) 描述了 $R_{i,set}$ 变化时的 $N_{i,max}$ 最优配置及对应的 P_c 和 E 。

由图 4(b) 可知: 1) $N_{i,max}$ 的最优值随着 $R_{i,set}$ 的增加而减小; 2) 结合图 4(a) 可知, $R_2 = 2$ 时, $N_{2,max}$ 的最优值随着 R_3 的增加而增加; $R_2 > 2$ 时, $N_{2,max}$ 的最优值随着 R_2 的增加而减小, 且 $R_2 \geq 8$ 时 $N_{2,max}$ 取最小值 1; 3) $N_{3,max}$ 的最优值为 1, 且不受 $R_{i,set}$ 变化的影响。

由图 4(c) 可知: 1) E 随着 R_1 的增加而增加, 且几乎不受 R_2, R_3 变化的影响; 2) P_c 随着 $R_{i,set}$ 的增加呈分段性变化, 结合图 4(a) 可知, $R_1 = 1$ 时 P_c 不受 R_2 和 R_3 变化的影响; $R_1 = 2$ 时, P_c 增加约 0.007, 这是因为 4.2 节的算法优先保证 E 最小, $P_c \leq 0.01$ 即可, 此时牺牲部分接入失败概率换取了更低的功耗; $R_1 > 2$ 时, E 最优值增加, 以 E 的增长换取 P_c 降低。

前导码重复作为 NB-IoT 覆盖增强的有效手段之一, 配合 $N_{i,max}$ 可以实现以较低的功耗得到较高的接入成功概率。增加 R_i 增加接入失败概率减少量 P_s , 结合图 4 和式(9)可知 R_1 对 P_c 和 E 的影响较大, R_2 对 $N_{2,max}$ 最优取值的影响较大, 因此 R_i 最佳的配置为 $R_1 = 1, R_2 \leq 4, R_3 > R_2$ 。

5.2 t 与 $N_{i,max}$ 最优取值及 P_c 和 E 关系

令 $t = 1, \{R_1, R_2, R_3\} = \{1, 2, 4\}, N = 200$, 图 5 描述

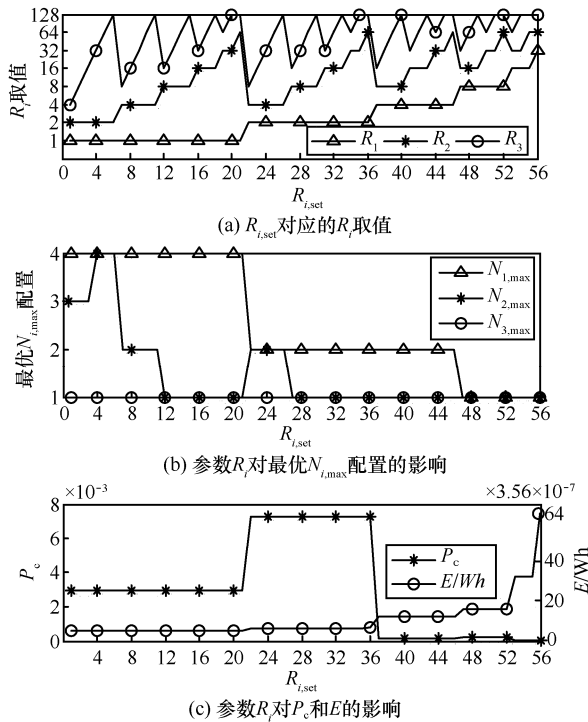


图 4 参数 R_i 对最优 $N_{i, \text{max}}$ 配置及对应 P_c 和 E 的影响

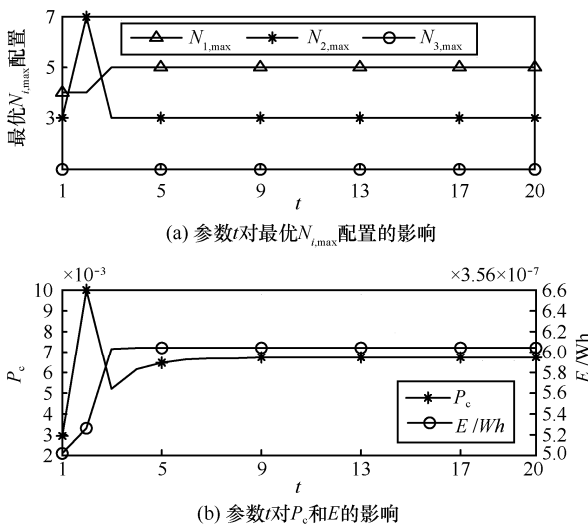


图 5 参数 t 对最优 $N_{i, \text{max}}$ 配置及对应 P_c 和 E 的影响

了系统负载 t 在 [1,20] 范围内变化时, 系统的最优 $N_{i, \text{max}}$ 取值及对应 P_c 和 E 的变化规律。由图 5(a) 可知: 1) $t \leq 3$ 时 $N_{1, \text{max}}$ 最优值随着 t 增加而增加, $N_{2, \text{max}}$ 最优值在 $t=2$ 时较大, 而 $N_{3, \text{max}}$ 最优值不变; 2) $t > 3$ 时 $N_{i, \text{max}}$ 最优值稳定不变。

由图 5(b) 可知: 1) $t \leq 6$ 时 $N_{i, \text{max}}$ 最优值对应的 P_c 和 E 均随着 t 的增加而增加, $t=2$ 时 P_c 最优值刚好等于 P_{th} , 因为 4.2 节求解方法优先保证 E 最小, 即以 P_c 的增加换取更小的 E ; 2) $t > 6$ 时 P_c 和 E 趋于稳定。结合式(11)可知, $t < 6$ 时单次接入失败概

率 $P_{f, i}$ 随 t 的增加呈指数增加, 适当增加 $N_{i, \text{max}}$ 可以增加 E 为代价换取较低的平均接入失败概率; $t > 6$ 时, $P_{f, i}$ 趋近于 0, 增加 t 几乎不影响 P_c 和 E 的最优值, 此时只能采取其他方式降低 P_c 和 E , 如增加前导码重复次数。

5.3 N 与 $N_{i, \text{max}}$ 最优取值及 P_c 和 E 关系

令 $t=1, \{R_1, R_2, R_3\}=\{1, 2, 4\}$, 因 $N < 7$ 时式(11)无解, 图 6 描述了全局最大重传次数 N 在 [7,200] 之间变化时, 系统的 $N_{i, \text{max}}$ 最优取值及对应 P_c 和 E 的变化规律。由图 6(a) 可知: 1) $N_{2, \text{max}}$ 随着 N 的增加而阶段性增加; 2) $N_{1, \text{max}}, N_{3, \text{max}}$ 不受 N 变化的影响。

由图 6(b) 可知: 1) $N < 12$ 时 P_c 随 N 的增加迅速降低, 而 $N > 12$ 时降幅变小; 2) 与 P_c 相反, E 随 N 的增加而增加, 且 $N > 88$ 时 E 的增幅逐渐趋于 0。以上现象表明, 在 $N < 12$ 时, 增加 N 的值可以 E 的较小增加为代价迅速降低 P_c , 但 $N > 88$ 时增加 N 对 P_c 和 E 的影响很小。

此外, 由图 4~图 6 可知: 1) $N_{i, \text{max}}, P_c$ 和 E 随着以上 3 个参数的变化规律呈现阶段稳定性, 即参数在某一范围内变化几乎不会对 P_c 和 E 造成影响; 该现象是因为本文所取参数及 $N_{i, \text{max}}$ 最优值均为整数, 当参数在某一范围内对结果的影响很小时, 由于 Matlab 计算精度的限制使结果呈现出阶段稳定性, 当参数对结果的影响累积到一定程度时便出现“跳变”现象; 2) 由表 1 知协议规定的 $N_{i, \text{max}}$ 取值范围为 [0,10], 根据本文的仿真结果可将其最优取值的范围缩小为: ① $N_{1, \text{max}} \in [1,5]$, $N_{2, \text{max}} \in [1,7]$; ② $N_{3, \text{max}}$ 对 P_c 和 E 的影响很小, 一般 $N_{3, \text{max}}$ 取最小值 1。

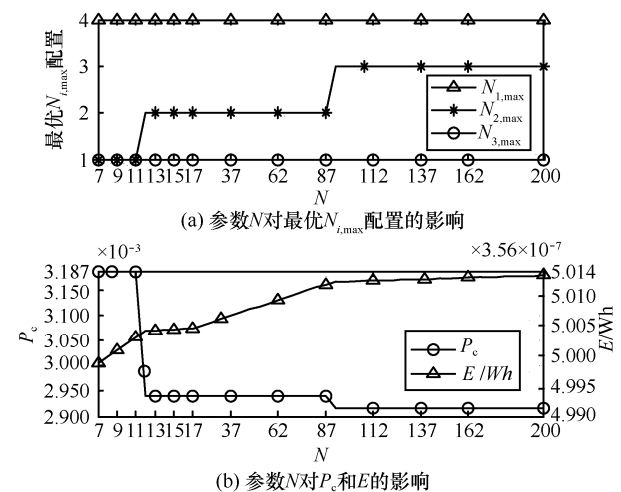


图 6 参数 N 对最优 $N_{i, \text{max}}$ 配置及对应 P_c 和 E 的影响

5.4 两个模型的 P_c 和 E 对比

令 $\{R_1, R_2, R_3\} = \{1, 2, 4\}$ 、 $E_0 = 3.56 \times 10^{-7}$ Wh、 $E_m = 0.5 E_0$ 、 $N = 200$ 、 $x = 0.9$ ，其中 E_m 为单次信道测量所需功耗，图 7 为 t 在 $[1, 10]$ 之间变化时，式(1)和式(4)所述模型的 P_c 和 E 最优值的对比结果。由图 7 可知：1) 3GPP 协议抽象模型的 P_c 随着 t 的增加而增加， E 随着 t 的增加而减小，即以部分接入失败概率换取更低功耗；2) 改进模型（引入了回退机制）的 P_c 比协议模型高约 16%，但其 E 比协议模型低约 95%。以上结论验证了第 3、4 节的模型分析，因此采用本文提出的覆盖类别更新机制可在保证平均接入失败概率较小的情况下实现超低功耗。

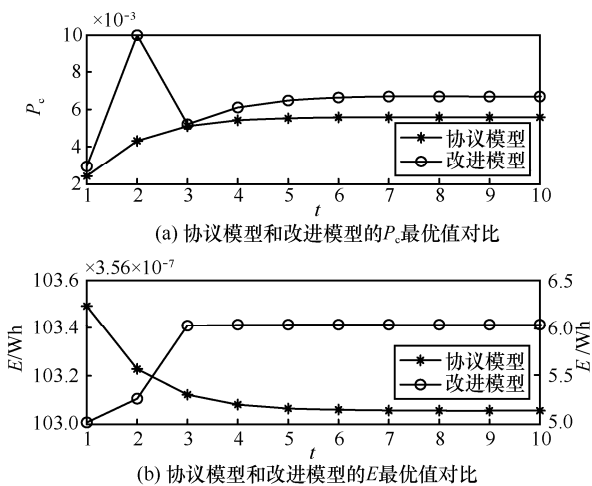


图 7 两个模型的 P_c 和 E 最优值对比

6 结束语

本文旨在建立 NB-IoT 覆盖类别更新机制及其性能分析的理论模型，并分析主要系统参数对 NB-IoT 性能的影响。以 3GPP 提出的 3 个覆盖类别为状态变量将 NB-IoT 随机接入过程建模为马尔可夫模型，本文提出了一套能够完整刻画 NB-IoT 随机接入过程中覆盖类别动态变化的覆盖类别更新机制，并建立了以最小化平均接入失败概率和平均功耗为目标的优化模型，给出了该模型最优解的求解办法。本文所做工作完善了 NB-IoT 随机接入过程覆盖增强中覆盖类别更新过程的理论分析，相关结论对于 NB-IoT 系统部署具有实践指导意义。下一步拟分析数据传输阶段的各类别最大传输次数对频谱效率 (SE, spectrum efficiency)、能耗效率 (EE, energy efficiency) 和部署效率 (DE, deployment efficiency) 之间的

关系，并给出数据传输阶段最大传输次数的最优取值建议。

参考文献:

- [1] RATASUK R, MANGALVEDHE N, ZHANG Y, et al. Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13[C]// 2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. 2016: 1-7.
- [2] 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.
- [3] GOZALVEZ J. New 3GPP standard for IoT [mobile radio][J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(1): 14-20.
- [4] 简鑫, 曾孝平, 贾云健, 等. 机器类通信流量建模与过载控制[J]. 通信学报, 2013, 34(9): 123-131.
JIAN X, ZENG X P, JIA Y J, et al. Traffic modeling for machine type communication and its overload control[J]. Journal on Communications, 2013, 34(9): 123-131.
- [5] SHARIATMADARI H, RATASUK R, IRAJI S, et al. Machine-type communications: current status and future perspectives toward 5G systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 10-17.
- [6] CHEN M, MIAO Y, HAO Y, et al. Narrow band internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 3(1): 20557-20577.
- [7] 简鑫, 曾孝平, 谭晓衡, 等. 改进的多信道 S-ALOHA 暂态性能分析办法及其应用[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.
- [8] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrowband Internet of Things[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 117-123.
- [9] JIANG N, DENG Y, CONDOLUCI M, et al. RACH preamble repetition in NB-IoT network[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1244-1247.
- [10] POLESE M, CENTENARO M, ZANELLA A, et al. M2M massive access in LTE: RACH performance evaluation in a smart city scenario[C]//2016 IEEE International Conference on Communications. 2016: 1-6.
- [11] RATASUK R, MANGALVEDHE N, KAIKKONEN J, et al. Data channel design and performance for LTE narrowband IoT[C]//2016 IEEE 84th Conference on Vehicular Technology Conference, 2016: 1-5.
- [12] MIAO Y, LI W, TIAN D, et al. Narrow band Internet of Things: simulation and modelling[J]. IEEE Internet of Things Journal. 2017: 1-1.
- [13] MANGALVEDHE N, RATASUK R, GHOSH A. NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT[C]// 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. 2016: 1-6.
- [14] RATASUK R, VEJLGAARD B, MANGALVEDHE N, et al. NB-IoT system for M2M communication[C]// 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2016: 1-5.
- [15] 何小丹, 宋磊. 基于速率需求的 NB-IoT 上行覆盖性能[J]. 电信科学, 2016(S1): 149-156.

- HE X D, SONG L. NB-IoT uplink coverage capability considering rate requirement[J]. Telecommunications Science, 2016(S1): 149-156.
- [16] 黄悦, 汤远方. NB-IoT 物联网组网及覆盖能力探讨[J]. 移动通信, 2017, 41(18): 11-15.
- HUANG Y, TANG Y. Discussion on networking and coverage capability for NB-IoT[J]. Mobile Communications, 2017, 41(18): 11-15.
- [17] 李建军. NB-IoT 组网方案研究[J]. 移动通信, 2017, 41(6): 14-18.
- LI J J. Research on NB-IoT networking scheme[J]. Mobile Communications, 2017, 41(6): 14-18.
- [18] 陈巍. 基于 NB-IoT 技术的单站覆盖仿真分析及验证[J]. 电脑与电信, 2017(8): 36-38.
- CHEN W. Simulation analysis and verification of single station coverage based on NB-IoT technology[J]. Computer & telecommunication, 2017(8): 36-38.
- [19] 赵元, 张力方, 邢宇龙, 等. NB-IoT 技术评估及组网方案研究[J]. 邮电设计技术, 2017(8): 40-45.
- ZHAO Y, ZHANG L F, XING Y L. Research on technology evaluation and networking scheme of NB-IoT[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2017(8): 40-45.
- [20] LAURIDSEN M, KOVÁCS I Z, MOGENSEN P, et al. Coverage and capacity analysis of LTE-M and NB-IoT in a rural area[C]// 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference. 2016: 1-5.
- [21] ADHIKARY A, LIN X, WANG Y P E. Performance evaluation of NB-IoT coverage[C]// 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference. 2016: 1-5.
- [22] YU C, YU L, WU Y, et al. Uplink scheduling and link adaptation for narrowband Internet of Things systems[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 1724-1734.
- [23] LIN X, ADHIKARY A, Wang Y P E. Random access preamble design and detection for 3GPP Narrowband IoT systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(6): 640-643.
- [24] MALIK H, PERVAIZ H, ALAM M M, et al. Radio resource management scheme in NB-IoT systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15051-15064.
- [25] 田浩, 杨霖, 李少谦. LTE 上行链路中基于探测参考信号的信噪比估计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 353-357.
- TIAN H, YANG L, Li S Q. SNR estimation based on sounding reference signal in LTE uplink[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2): 353-357.
- [26] YIN J, ZHU X, QUAN L, et al. Comprehensive multi-objective secularization optimization of a permanent magnet machine with correlation parameters stratified method[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(1): 72-79.
- [27] HARWAHYU R, CHENG R G, WEI C H. Investigating the performance of the random access channel in NB-IoT[C]// 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference. 2017: 1-5.
- [28] KARATAS M, YAKICI E. An iterative solution approach to a multi-objective facility location problem[J]. Applied Soft Computing, 2018, 62: 272-287.
- [29] SAFIKHANI H, ABBASSI A, KHALKHALI A, et al. Multi-objective optimization of nanofluid flow in flat tubes using CFD, Artificial Neural Networks and genetic algorithms[J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(5): 1608-1617.
- [30] HASSAN-POUR H A, MOSADEGH-KHAH M, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. Solving a multi-objective multi-depot stochastic location-routing problem by a hybrid simulated annealing algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(8): 1045-1054.
- [31] HARWAHYU R, CHENG R G, WEI C H, et al. Optimization of random access channel in NB-IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 391-402.

[作者简介]



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



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。



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。

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。

王芳 (1995-), 女, 四川泸州人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为无线通信理论与技术、分布式队列随机接入等。

付澍 (1985-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 重庆大学讲师, 主要研究方向为未来网络、边缘计算等。

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。