

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.04.021

基于重复和重传的窄带物联网覆盖增强分析

张艺涵¹, 李 鹏¹, 蒲 丹²,
王世谦¹, 李慧旋¹, 谢安邦¹

1. 国网河南省电力公司 经济技术研究院, 郑州 450052; 2. 重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400030

摘要: 在窄带物联网(NB-IoT)中, 重复和重传能增强覆盖能力. 针对随机部署的 NB-IoT 终端和基站, 分析基于重复和重传的覆盖增强性能, 导出了基站对前导码的检测概率、终端采用前导码重复传输时的检测概率和基于多频段多信道时隙 ALOHA 的冲突概率, 分析了终端对信道的竞争成功概率、随机接入成功率和平均接入时延, 针对 NB-IoT 划分的 3 个覆盖类别, 对重复和重传的性能进行了仿真分析. 结果表明, 检测概率随前导码重复次数的增加而增加, 但重复次数对随机接入成功率的影响不大; 随机接入成功率随重传次数和可用信道数量的增加而增加; 即使是在极端恶劣的应用场景, 平均接入时延也能满足规定的最大可容忍延迟要求.

关键词: 窄带物联网; 覆盖增强; 检测概率; 竞争成功概率; 随机接入成功率

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)04-0175-11

物联网设备集感知、通信、计算等功能于一体, 能实现数据采集、传输和加工^[1-4]. 近年来, 由 3GPP 提出的一种大规模低功耗广域(low power wide area, LPWA)技术——窄带物联网(narrow-band Internet of things, NB-IoT), 具有广覆盖、大连接、低功耗、低成本特点, 主要用于传感和数据采集场景, 适用于智能电网、智慧农业、智慧物流等领域. 覆盖增强包括基站覆盖的广度和深度, 除了通过减小信道带宽以提高功率谱密度外, NB-IoT 还引入了覆盖类别概念^[5], 并为不同覆盖类别配置不同的重复和重传参数.

针对 NB-IoT 覆盖增强技术, 文献[6]研究上行链路联合重复传输和带宽分配, 分析了不同资源配置对覆盖增强的影响, 并结合信噪比、带宽利用率和单位比特能耗, 提出了一种上行链路自适应算法; 文献[7]考虑 MAC 冲突设计物理层前导码结构, 将一组长前导码划分为多组短前导码, 以增加正交前导码数量, 但降低前导码冲突概率是以牺牲前导码检测概率为代价的; 文献[8]采用机器学习将前导码重复次数与系统能耗建模为一种多武装匪徒攻防框架, 采用动态接入减少前导码重复次数, 在增强覆盖的同时降低系统能耗; 文献[9]结合接收信噪比和冲突条件分析随机接入成功率, 结果表明, 前导码重复传输可以在轻载下提高随机接入成功率, 但在重载下, 信道资源利用率较低, 且随机接入成功率提高有限. 文献[10]采用泊松点过程描述终端和基站分布, 并利用离散时间马尔可夫链表征终端队列和协议状态, 但该模型只能在稳态下获得结果, 无法捕获时间演化过程的前导码检测概率. 文献[11]基于覆盖类别建立马尔可夫链模型, 采用多目标优化算法分析前导码重复次数、最大重传次数、接入负载对覆盖能力的影响, 但未考虑前导码在冲突时的回退机制; 文献[12]构建了一种队列模型, 用于分析不同调度机制对通信延迟和终端功耗的影响; 文献[13]基于前导码重复传输和自适应调制编码方案来增强覆盖, 提出了一种周期性调整重复次数来

收稿日期: 2020-08-17

基金项目: 国家电网公司科技项目(1400-202024222A-0-0-00); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项重点项目(cstc2017jcyjBX0047).

作者简介: 张艺涵, 硕士, 工程师, 主要从事能源电力、配电网规划、电力通信等方面的研究.

应对误块率的内环链路自适应方案和一种协调调制编码方案选择和重复次数确定的外环链路自适应方案,旨在提高系统吞吐量的同时降低资源消耗;文献[14]导出了终端发起随机接入请求和数据包成功传输概率,基于马尔可夫链对队列长度和重传次数建模,分析了终端数量、数据包生成率、重传次数和队列长度等对系统吞吐量的影响。

上述针对 NB-IoT 的覆盖增强技术都是采用重复和重传来增强覆盖能力,即通过重复传输前导码来提高基站对前导码的检测概率,通过增加接入次数来提高终端对信道的竞争成功概率。但是, NB-IoT 的窄带物理随机接入信道(narrowband physical random access channel, NPRACH)与窄带物理上行共享信道(narrowband physical uplink shared channel, NPUSCH)共用相同的时频资源,重复和重传会降低资源利用率、增加系统能耗。本文针对随机部署的终端和基站,分析了基于重复和重传的覆盖增强性能,首先建立了基于随机几何的前导码检测概率模型和基于多频段多信道时隙 ALOHA 的冲突概率模型,分析了终端采用前导码重复传输的检测概率和终端对信道的竞争成功概率,然后导出了终端的随机接入成功率和平均接入时延,最后结合 NB-IoT 划分的覆盖类别,对重复和重传的性能进行了仿真分析。

1 随机接入过程

NB-IoT 支持的业务对时延不敏感且触发周期长,故采用随机接入协议^[15]。在 NB-IoT 中,终端在空闲模式和连接模式下启动随机接入过程,采用与 LTE 相同的 4 个步骤,但由于 LTE 与 NB-IoT 支持的业务不同,3GPP 优化了随机接入过程,二者的随机接入信道特性对比如表 1 所示。

表 1 NB-IoT 与 LTE 随机接入信道特性对比

	NB-IoT	LTE
频域	3.75 kHz 子载波间隔 1 个 PRACH Band 45 kHz, 最多配置 4 个 Band	1.25 kHz 子载波间隔 6 个 PRACH Band, 占用 839 个子载波
时域	CP+5 Symbols 为 1 个 Symbol Group 4 个 Symbol Group 为 1 个信道支持两种 CP 长度	FDD 有 4 种格式, 对应不同的 CP 长度: Sequence 和 Guard 长度
前导码序列	辅以跳频的全 1 序列	Zadoff-Chu 序列
信道数量	根据频域和时域配置确定	一个小区 64 个前导码
复用方式	不同终端通过 FDM/TDM 复用, 不支持前导码复用	相同时频资源, 不同前导码码分复用

基于竞争的随机接入过程包括 4 个步骤:

步骤 1: 终端发送随机接入请求消息。在传输前导码前, 终端确定 NPRACH 的资源配置信息, NPRACH 资源配置取决于覆盖类别。频域资源有两种: 一是将子载波划分为 4 个带宽, 每个带宽包含 12 个 3.75kHz 子载波; 二是将子载波划分为 3 个带宽, 每个带宽包含 16 个 3.75kHz 子载波, 定义了子载波数和子载波偏置参数。时域资源定义了周期 nprach-Periodicity、起始子帧位置 nprach-StartTime 等参数。不同覆盖类别还需要确定前导码重复次数、发送前导码的最大次数以及下行 NPDCCH 监听位置等参数。

步骤 2: 基站发送随机接入响应消息。终端发送前导码后, 在特定的时间窗口接收来自基站的随机接入响应(random access response, RAR)消息。RAR 消息中携带的信息包括: 定时偏移量、步骤 3 调度信息、UL Grant、Temporary C-RNTI 和 RA-Preamble identifier 等。如果 RAR 消息中包含有与终端此前发送一致的 RA-Preamble identifier, 则终端认为响应成功, 接下来进行上行调度传输, 执行步骤 3。如果在随机接入监听时间窗口, 终端未收到 RAR 消息或收到的 RAR 消息验证失败, 则终端认为响应失败。响应失败后, 如果终端的随机接入尝试次数未达到最大尝试次数, 重新进行下一次随机接入尝试, 否则本次随机接入请求过程失败, 最大尝试次数从步骤 1 的 SIB2(system information block, SIB2)中获得。

步骤 3: 终端进行上行调度传输: 终端收到 RAR 消息后, 即可获得上行时间同步和上行资源, 但仍无法确定 RAR 消息是发送给自己的还是其他终端的。终端利用步骤 2 分配的 UL Grant 资源发送步骤 3, 执

行 RRC 连接建立请求, 同时启动冲突检测定时器等待步骤 4.

步骤 4: 基站进行竞争决议. 基站收到步骤 3 后需要进行竞争解决, 并将结果发送给终端, 如果竞争决议成功, 表示基于竞争的随机接入过程结束; 如果竞争决议定时器超时, 终端认为竞争决议失败. 失败后, 如果终端的随机接入尝试次数小于最大尝试次数, 在下一个可用随机接入资源中重新发起随机接入请求, 否则本次随机接入过程失败.

所有终端均采用全 1 序列生成前导码, 通过 SIB2 获取随机接入信道配置信息, 通过测量参考信号接收功率并与基站广播的阈值比较选择覆盖类别, 在覆盖类别对应的 NPRACH 时频域资源段传输固定格式的前导码发起随机接入请求.

在随机接入过程的 4 个步骤中, 仅在步骤 1 通过 NPRACH 发送前导码, 而在其余步骤, 终端与基站之间的信息交互是通过上行链路和下行链路数据传输信道进行的. 对于上行传输, NPRACH 用于前导码传输, 而 NPUSCH 用于数据传输. 当大量终端同时发送前导码时, 由于基站无法识别终端, 导致接入冲突, 因此在随机接入过程中, 基站对前导码的检测性能对于终端与基站之间能否成功建立连接非常重要. 导致随机接入过程步骤 1 失败的主要原因有两个: 一是基站对前导码的接收信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)较低, 无法检测和识别; 二是基站同时接收到两个及以上相同的前导码, 发生冲突, 无法区分已发生冲突的前导码.

2 性能分析

2.1 基站对前导码的检测概率

假设 NB-IoT 基站和终端部署服从二维空间 \mathbb{R}^2 中密度分别为 λ_B 和 λ 的独立齐次泊松点过程 Φ_B 和 Φ_D , 每个终端都与其地理位置靠近的基站关联, 形成泰森多边形镶嵌^[16], 如图 1 所示, 三角形代表基站, 点代表终端.

鉴于在大多数 NB-IoT 应用中, 终端部署固定或移动性较低, 进一步假设基站和终端部署完成后, 其数量和位置保持不变, 基站与终端间的传输路径损耗采用幂律模型 $r^{-\alpha}$, r 为传输距离, α 为路径损耗指数. 假设信道服从瑞利分布, 其信道增益 g 是具有单位均值指数分布的随机变量. 为简单计, 这里仅分析单小区 NB-IoT 基站对前导码的检测概率, 其上行传输模型如图 2 所示. 假设在任何特定的时频资源上, 终端都以固定功率(ρ)传输信号, 在随机接入过程中, 终端随机选择一个前导码发送到基站, 请求信道资源. 终端与基站之间的距离用随机变量 R 表示, 干扰来自小区内的其它终端.

在每个时隙, 基站对前导码的接收信干噪比可表示为

$$\gamma = \frac{P_r}{I_z + \sigma^2} \quad (1)$$

其中, P_r 为基站对前导码的接收功率, σ^2 为加性噪声功率, I_z 为小区内除目标终端外其余终端(干扰终端)产生的干扰. 用 $Z = \{z_i | i = 1, 2, \dots, k\}$ 表示小区内干扰终端集合, 若 $z_i \in Z$, 干扰终端 z_i 到基站的距离用 D_i 表示, 那么基站对来自目标终端的接收功率和来自小区内干扰终端的接收功率分别为

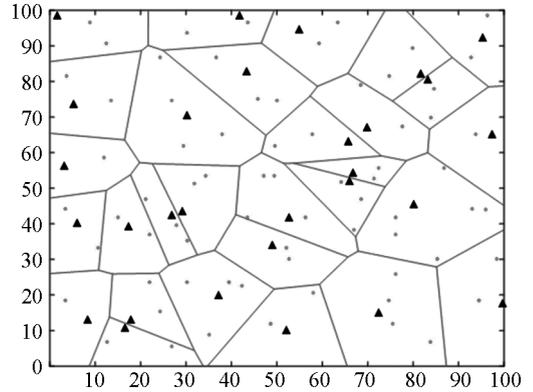


图 1 基站和终端部署服从独立齐次泊松点过程示意图

其上行传输模型如图 2 所示. 假设在任何特定的时频资源上, 终端都以固定功率(ρ)传输信号, 在随机接入过程中, 终端随机选择一个前导码发送到基站, 请求信道资源. 终端与基站之间的距离用随机变量 R 表示, 干扰来自小区内的其它终端.

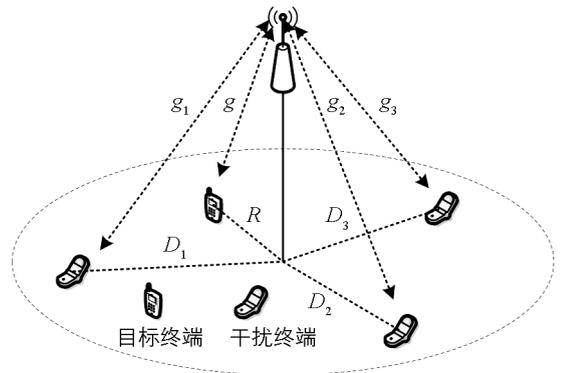


图 2 单小区 NB-IoT 上行传输模型

$$P_r = \rho g R^{-\alpha} \quad (2)$$

$$I_z = \sum_{z_i \in Z} \rho g_i D_i^{-\alpha} \quad (3)$$

其中, $g, g_i, i=1, \dots, k$ 分别为目标终端和干扰终端集合与基站之间的信道增益. 将式(2)、式(3)代入式(1)得:

$$\gamma = \frac{\rho g R^{-\alpha}}{\sum_{z_i \in Z} \rho g_i D_i^{-\alpha} + \sigma^2} \quad (4)$$

首先分析终端与基站之间距离 R 的分布. 在以基站为圆心, 半径为 $r (r < R)$, 即面积为 πr^2 的区域内无终端的概率为

$$p_r(R > r) = e^{-\lambda \pi r^2} \quad (5)$$

那么, 在该区域内有终端的概率可表示为

$$p_r(R \leq r) = 1 - e^{-\lambda \pi r^2} \quad (6)$$

从而, 终端与基站之间距离 R 的概率密度函数为

$$f_R(r) = 2\pi\lambda r e^{-\lambda \pi r^2}, r \geq 0 \quad (7)$$

如果基站对终端发送前导码的接收信干噪比高于基站预定的检测阈值 T , 则可以在关联基站处检测和识别该前导码, 反之, 基站不能检测和识别该前导码. 因为终端与基站之间的信道增益 g 服从单位均值的指数分布, 所以基站对前导码的检测概率可表示为

$$\begin{aligned} p_c &= p_r(\gamma > T) = \\ &= \int_{r>0} p_r(\gamma > T | r) f_R(r) dr = \\ &= \int_{r>0} p_r[g > Tr^\alpha \rho^{-1}(\sigma^2 + I_z) | r] 2\pi\lambda r e^{-\lambda \pi r^2} dr = \\ &= \int_{r>0} e^{-Tr^\alpha \rho^{-1} \sigma^2} L_z(Tr^\alpha \rho^{-1}) 2\pi\lambda r e^{-\lambda \pi r^2} dr \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $L_z(Tr^\alpha \rho^{-1})$ 表示干扰终端集合的拉普拉斯变换. 进一步令 $s = Tr^\alpha \rho^{-1}$, 并利用信道增益的独立性和随机几何的概率母函数可得,

$$\begin{aligned} L_z(s) &= E_{D_i} \left[\prod_{z_i \in Z} E_{g_i} \exp(-s \rho g_i D_i^{-\alpha}) \right] = \\ &= \exp \left[-2\pi\lambda \int_r^\infty (1 - E_{g_i}(\exp(-s \rho g_i D_i^{-\alpha}))) D_i dD_i \right] \end{aligned} \quad (9)$$

信道增益 g_i 也服从单位均值的指数分布, 令 $t = (D_i/r)^2$, 利用指数分布的矩生成函数可得:

$$L_{I_z}(Tr^\alpha \rho^{-1}) = \exp \left(-\pi\lambda r^2 \int_1^\infty \frac{T}{T + t^{a/2}} dt \right) \quad (10)$$

为简单计, 假设加性噪声功率为 0, 即 $\sigma^2 = 0$, 由此获得基站对前导码的检测概率为

$$p_c = \int_0^\infty 2\pi\lambda r e^{-\pi\lambda r^2} \exp \left(-\pi\lambda r^2 \int_1^\infty \frac{T}{T + t^{a/2}} dt \right) dr \quad (11)$$

采用前导码重复传输的检测概率 p_{cd} 可表示为

$$p_{cd} = 1 - (1 - p_c)^N \quad (12)$$

其中, $p_c = e^{-(N-1)}$ 表示综合考虑基站捕获效应或接收机灵敏度时, 前导码重复传输 N 次对检测失败概率的减少因子^[17], 即:

$$p_{cd} = 1 - \left(1 - \int_0^\infty 2\pi\lambda r e^{-\pi\lambda r^2} \exp \left(-\pi\lambda r^2 \int_1^\infty \frac{T}{T + t^{a/2}} dt \right) dr \right)^{N-1} \quad (13)$$

2.2 终端对信道的竞争成功概率

多频段多信道时隙 ALOHA 协议是在不同频段运行的多信道时隙 ALOHA 协议^[18], 该协议为每个终

端分配初始接入频段, 并随机选择信道发送数据. 将时间划分为时隙, 假设所有频段的时隙长度相同, 且所有频段的时隙起始时刻同步, 当两个及以上的终端利用同一信道的同一时隙发起随机接入请求时就会发生冲突, 冲突终端在下一个可用的随机接入资源重新发起新的接入请求. 每个频段能容纳的最大终端数取决于可用资源, 若在某个频段的终端最后一次接入尝试失败, 就在更高频段重新发起新的接入尝试, 直到达到最大重传次数为止. 若在达到最大重传次数时仍失败, 就宣告此次随机接入请求失败. NPRACH 在各覆盖类别均采用该协议, 本文基于该协议分析 NB-IoT 随机接入过程中终端对信道的竞争成功概率.

考虑一个具有 B 个频段的多信道时隙 ALOHA 系统, M 个终端同时启动随机接入过程, 用 $m_b M$ 表示在频段 b 的初始终端数, $0 \leq b \leq B-1$, $\sum_{b=0}^{B-1} m_b = 1$, 用 s_b , $r_{\max,b}$ 分别表示基站为频段 b 预留的可用信道数和允许的最大重传次数, $r_{\max,G}$ 表示在所有频段允许的最大重传次数. 根据 3GPP 划分的 3 个覆盖类别, $B=3$, 令 $r_{\max,G}=6$, $r_{\max,0}=2$, $r_{\max,1}=r_{\max,2}=3$, $s_2=2s_1=2s_0$. 如图 3 所示, 分别用实线、长虚线和短虚线表示终端在频段 0, 1 和 2 的最大重传次数, 即在频段 0, 终端可进行 $r_{\max,0}$ 次接入尝试, 如果接入失败则转移至频段 1, 终端可在频段 1 进行 $r_{\max,1}$ 次接入尝试, 如果接入失败再转移至频段 2, 可在频段 2 进行 $r_{\max,G} - r_{\max,1} - r_{\max,0}$ 次接入尝试, 此时已达到所有频段的最大重传次数, 如果仍然失败, 则宣告此次随机接入过程失败. 初始在频段 1 和 2 的终端, 竞争信道资源的过程与初始在频段 0 的终端类似.

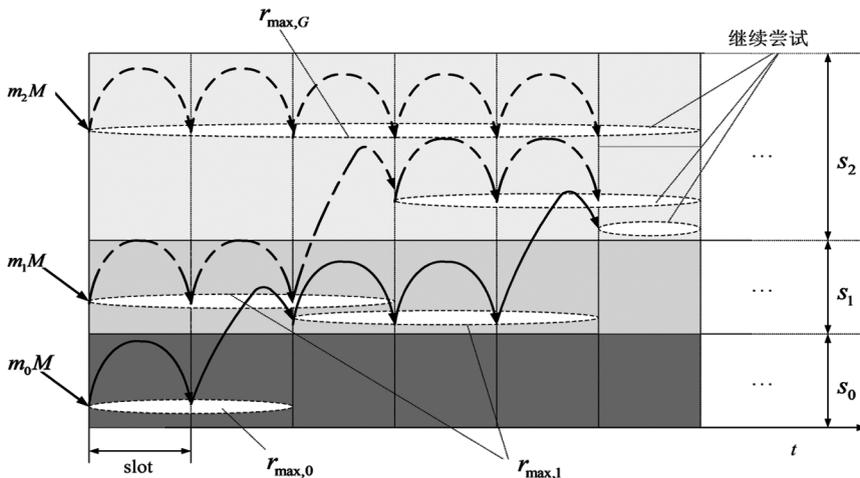


图 3 多频段多信道时隙 ALOHA 协议示意图

用单个时隙内终端对信道的竞争成功概率评估系统的性能, 定义为该时隙内竞争信道成功的终端数除以该时隙内总的竞争终端数. 用 $M_i[n]$ 表示在第 i 个时隙内进行第 n ($1 \leq n \leq r_{\max,G}$) 次接入尝试的终端数, 包含在频段 0, 1 和 2 的终端. 将 $M_i[n]$ 个终端同时竞争有限信道资源问题建模为箱子和球的问题, 即 m 个球放进 s 个箱子, 统计竞争成功的终端数类似于统计只有一个球的箱子数. 当 $m > s$ 时, 期望只有一个球的箱子数量可表示为 $me^{-m/s}$. 在 NB-IoT 中, 由于 $M_i[n] > s$, 在第 i 个时隙进行第 n 次接入尝试竞争成功的终端数可表示为

$$S_i[n] = \sum_{n=1}^{r_{\max,G}} M_i[n] e^{-\sum_{n=1}^{r_{\max,G}} M_i[n]/s}, \quad 1 \leq n \leq r_{\max,G} \quad (14)$$

其中, $s = \sum_{b=0}^{B-1} s_b$. 那么, 单个时隙内终端对信道的竞争成功概率可表示为

$$p_u = e^{-\sum_{n=1}^{r_{\max,G}} M_i[n]/s} \quad (15)$$

单个时隙内参与竞争的终端数包含上次竞争失败的终端和在该时隙开始竞争的终端, 在每个时隙中, 竞争成功的终端在下一时隙不参与竞争. 假设系统趋于稳定, 即上一时隙竞争成功的终端数和下一时隙开始竞争的终端数趋于平衡, 那么, $\sum_{n=1}^{r_{\max,G}} M_i[n] = M$, 式(15)可改写为

$$p_u = e^{-M/s} \quad (16)$$

2.3 随机接入成功率

利用基站对前导码的检测概率和终端对信道的竞争成功概率导出随机接入成功率. 显然, 结合式(13)和式(16), 随机接入成功率 p_p 可表示为

$$p_p = \left(1 - \left(1 - \int_0^\infty 2\pi\lambda r e^{-\pi\lambda r^2} \exp\left(-\pi\lambda r^2 \int_1^\infty \frac{T}{T+t^{a/2}} dt\right) dr\right) e^{-(N-1)}\right) e^{-M/s} \quad (17)$$

如果终端在随机接入响应时间窗口内未收到 RAR 消息, 也未达到最大接入尝试次数, 可以利用下一个随机接入资源重新发送新的接入请求, 直到达到最大接入尝试次数或随机接入成功. 考虑最大重传次数下的随机接入成功率 p_s 可表示为

$$p_s = \sum_{j=1}^{r_{\max,G}} p_p (1 - p_p)^{j-1} = 1 - (1 - p_p)^{r_{\max}} \quad (18)$$

2.4 平均接入时延

在 NB-IoT 中, 采用重复和重传固然可以提高检测概率和随机接入成功率, 从而达到覆盖增强的目的, 但重复和重传不仅会增加通信开销和处理能耗, 还会增大接入时延, 势必会对时延敏感型业务造成影响. 为此, 需要分析重复、重传和可用信道数量等对接入时延的影响.

在启动随机接入过程前, 终端需要获得下行链路定时信息和接收小区相关信息. 首先, 终端执行下行链路同步处理, 对窄带主同步信号和窄带辅同步信号解码, 一旦解码成功, 终端通过窄带物理广播信道承载的主信息块(master information block for NB-IoT, MIB-NB)获取信息, MIB-NB 包含了终端后续解读系统信息块(system information blocks, SIB)所需的基本信息. 终端读取 MIB-NB 后解读 SIB 消息, 包括小区接入、小区选择和其他 SIB 的调度消息等, 获得表 2 所示的系统相关信息. 用 T_{start} 表示终端决定接入网络到开始随机接入过程的准备时间, $T_{\text{start}} \in \{0\text{ms}, \text{nprach-Periodicity}\}$ 服从均匀分布, 其均值为 nprach-Periodicity 的一半^[19].

表 2 随机接入参数

参 数	取 值
PRACH 重复周期/ms	40, 80, 160, 240, 320, 640, 1 280, 2 560
起始子帧位置/ms	8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1 024
可用信道数量	12, 24, 36, 48
重复次数/次	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
最大接入尝试次数/次	3, 4, 5, 6, 7, 8, 10
响应窗口大小	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10

终端开始随机接入过程后, 根据重复次数配置集合重复选择前导码并利用 NPRACH 传输. 终端发送前导码后, 需要在响应时间窗口内等待基站回复 RAR 消息, 响应时间窗口的开始时间根据重复次数不同会有相应的变化. 当前导码重复次数大于或等于 64 次时, 在前导码传输完成, 持续到第 41 个子帧结束后开启响应时间窗口, 否则在前导码传输完成, 持续到第 4 个子帧结束后开启响应时间窗口. 如果在响应时间窗口内终端未收到 RAR 消息, 可以在下一个随机接入资源中重新发送新的随机接入请求进行接入尝试, 两次随机接入请求的时间间隔用 T_{int} 表示, 接入尝试次数由最大重传次数决定. 若在响应时间窗口内接收到来自基站的 RAR 消息, 终端继续执行后续接入步骤, 保持与基站连接, 接入成功后, 利用 NPUSCH 开始数据传输, 结束随机接入过程. 通过上述分析, 可以将终端发起一次随机接入请求的时延 T_{delay} 表示为

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{nprach_StartTime}} + T_{\text{start}} + T_r \quad (19)$$

其中, $T_{\text{nprach_StartTime}}$ 表示起始子帧位置, T_r 表示重传引起的时延, 可表示为

$$T_r = r \times [(N \times T_{\text{preamble}}) + T_{\text{wait}} + T_{\text{RWS}}] + [(r - 1) \times T_{\text{int}}] \quad (20)$$

其中, r 表示随机接入尝试次数, 即重传次数, $1 \leq r \leq r_{\max,G}$; N 表示前导码重复次数; T_{preamble} 表示前

导码持续时间; T_{wait} 表示从前导码传输结束到响应时间窗口开启之间的等待时间; T_{RWS} 表示响应时间窗口大小.

为了导出平均接入时延,首先计算 T_r 的平均值. 计算 T_r 的平均值基于这样一个事实,即终端在第 $r_{\text{max},G}$ 次接入尝试前的随机接入过程是成功的,否则计算平均时延无意义. 基于 Bayes 后验概率准则, $r_{\text{max},G}$ 次接入尝试的成功概率可表示为

$$p_r(r | r_{\text{max},G}) = \frac{p_r(r) \times p_r(r_{\text{max},G} | r)}{p_r(r_{\text{max},G})} \quad (21)$$

其中, $p_r(r)$ 表示第 r 次接入尝试的成功概率; $p_r(r_{\text{max},G})$ 表示直到第 $r_{\text{max},G}$ 次接入尝试的成功概率; $p_r(r_{\text{max},G} | r)$ 表示在第 r 次接入尝试成功下,第 $r_{\text{max},G}$ 次接入尝试的成功概率. 由于在第 r 次接入尝试成功,那么在 $r_{\text{max},G}$ 次接入尝试也必然成功,即 $p_r(r_{\text{max},G} | r) = 1$, 此时,

$$p_r(r | r_{\text{max},G}) = \frac{p_p \times (1 - p_p)^{r-1}}{p_s} \quad (22)$$

$r_{\text{max},G}$ 次接入尝试下的平均接入时延为

$$E(T) = \sum_{r=1}^{r_{\text{max},G}} \{r \times [N \times T_{\text{preamble}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{RWS}}] + [(r-1) \times T_{\text{int}}]\} \times \frac{p_p(1-p_p)^{r-1}}{p_s} \quad (23)$$

从而平均接入时延可表示为

$$E(T_{\text{delay}}) = T_{\text{nprach_StartTime}} + \frac{T_{\text{nprach_Periodicity}}}{2} + E(T_r) \quad (24)$$

3 仿真分析

3.1 检测概率

基站对前导码的检测概率随阈值 T 的变化曲线如图4所示,横坐标是对阈值 T 取对数,由图可知,随着阈值的增大,基站对接收 SINR 的要求越高,导致检测概率不断降低,最终趋于零. 传输路径损耗也是影响检测概率的重要因素之一,由于 PPP 模型模拟了远距离干扰,当路径损耗指数 α 较小时,远距离终端的干扰更显著. 此外,PPP 模型的一个弱点是人为造成附近占主导地位干扰终端的概率高,当路径损耗指数较小时,非主要干扰源的衰减缓慢,导致对来自目标终端的接收功率在总干扰中的占比较低,出现了在相同条件下路径损耗指数越大检测概率越高现象.

图5所示为不同阈值 T 下检测概率随前导码重复次数的变化曲线. 在3种阈值下,基站对前导码的检测概率随前导码重复次数的增加而增大,当前导码重复次数为8时,3种阈值下的检测概率可达99%,满足3GPP设定的99%以上检测概率的要求. 在前导码重复次数达到8次后,检测概率的变化趋势明显降低,达到一种稳定状态,若继续增加前导码重复次数,对检测概率的提高并无实际意义.

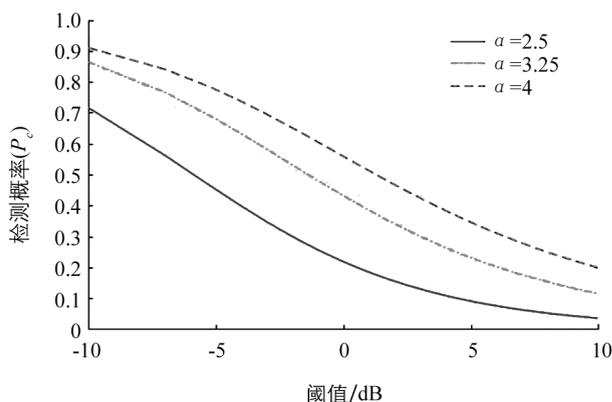


图4 不同路径损耗指数下检测概率随阈值的变化曲线

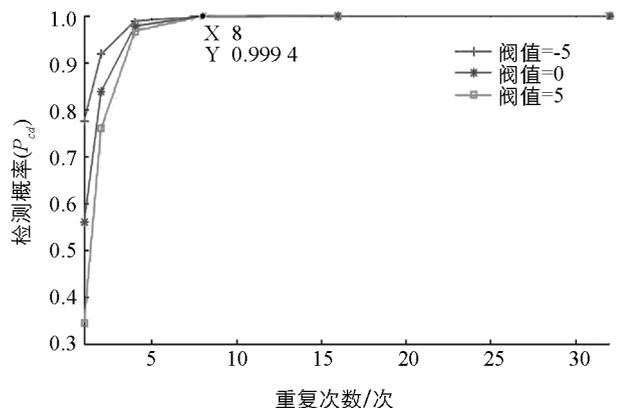


图5 不同阈值下检测概率随前导码重复次数的变化曲线

3.2 随机接入成功率

设置终端密度 $\lambda = 500$ 个/ km^2 , 路径损耗指数 $\alpha = 4$, 阈值 $T = 0$ dB, 分析相关参数对随机接入成功率

的影响. 首先, 在随机接入请求一次下分析重复次数对随机接入成功率的影响, 设置竞争终端数量 $M=50$, 如图 6 所示, 即使检测概率很高, 随机接入成功率仍然很低, 随着前导码重复次数的增加, 随机接入成功率逐渐趋于一个稳定值. 对不同信道数量进行比较可以看出, 可用信道数量越多, 随机接入成功率越高, 这是因为在竞争终端数量不变的情况下, 可用信道数量越多, 会有更多的终端竞争信道成功, 从而提高随机接入成功率.

图 7 是图 6 的相对情况, 在图 7 中, 设置竞争终端数量 $M=20$, 相比于图 6, 图 7 的随机接入成功率更高, 这是由于竞争终端数量减少, 终端之间的竞争降低, 使得在相同可用信道数量下, 随机接入成功率增大. 此外, 两种配置下的仿真结果具有相同趋势, 即随着重复次数的增加, 随机接入成功率趋于一个稳定值. 其中, 当可用信道数量为 48 时, 随机接入成功率最高, 对应于 3.75 kHz 的子载波间隔. 因此, 在极端覆盖下, 采用 3.75 kHz 的子载波间隔不仅可以获得更高的功率谱密度, 也提供了更多的可用信道资源, 使得处于极端信道环境下的终端也能被覆盖.

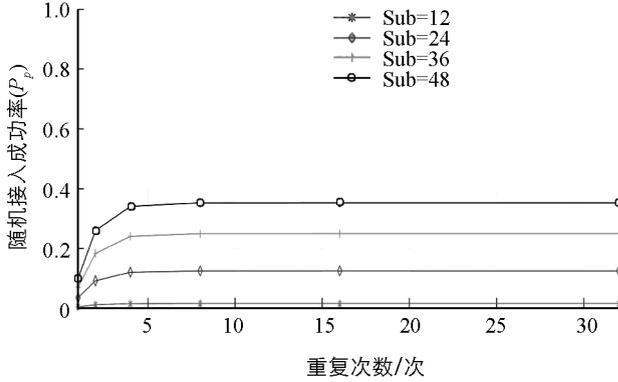


图 6 随机接入成功率随前导码重复次数变化曲线 ($M=50$)

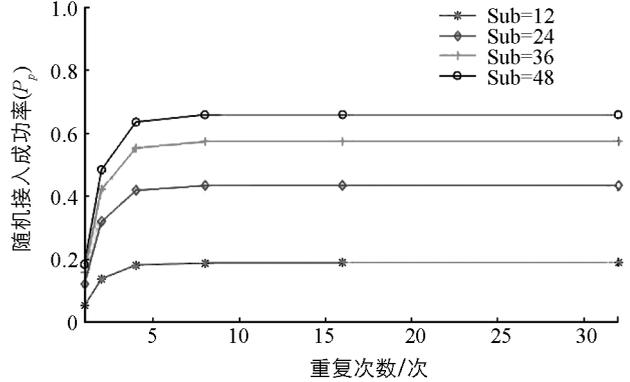


图 7 随机接入成功率随前导码重复次数变化曲线 ($M=20$)

尽管如此, 只考虑一次随机接入请求, 终端的随机接入成功率仍然较低, 为了进一步提高随机接入成功率, 则采用重传技术, 如图 8 和图 9 所示为 $M=50$ 和 $M=20$ 个终端随机接入成功率随重传次数和可用信道数量变化曲线. 在图 8 中, 在一个时隙竞争终端数量较多, 而可用信道数量只有 12 个时, 可用资源少, 多个并发的随机接入请求导致拥塞, 虽然随机接入成功率随着重传次数的增加可趋于 100%, 但需要的重传次数非常大, 不仅会占用更多的资源, 而且还会增加能耗开销. 随着可用信道数量的增加, 随机接入成功率也得到了显著改善, 这是由于在竞争时, 可用资源增加, 每次接入尝试后等待重传的终端减少, 降低了终端竞争信道资源的冲突概率. 图 9 所示为一个时隙中竞争终端数量较少场景, 与图 9 不同, 由于竞争终端数量减少, 即使可用信道数量为最低配置, 也能在使用较少重传次数下使随机接入成功率趋于 100%. 由此可知, 减小单个时隙内的竞争终端数量、增加可用信道数量以及采用重传技术可以提高随机接入成功概率.

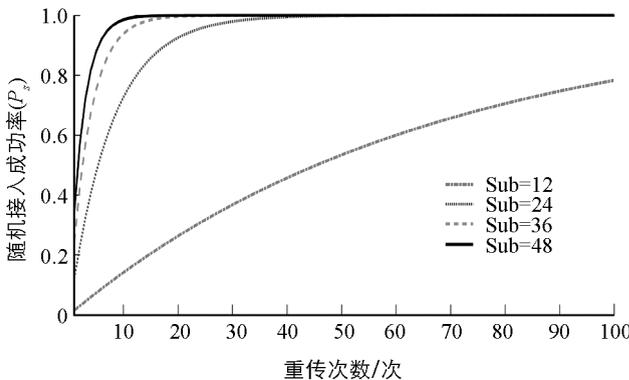


图 8 随机接入成功率随重传次数和可用信道数量变化曲线 ($M=50$)

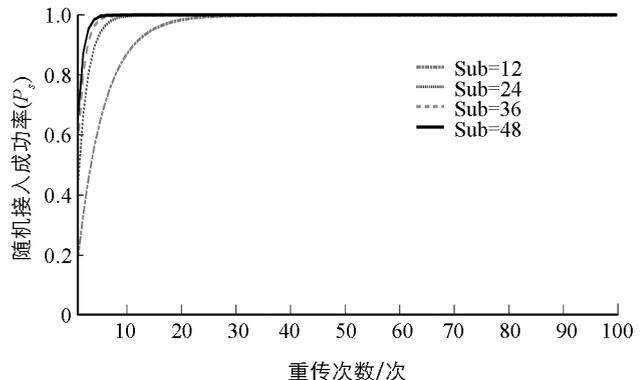


图 9 随机接入成功率随重传次数和可用信道数量变化曲线 ($M=20$)

3.3 平均接入时延

针对 3GPP 为 NB-IoT 定义的 3 个覆盖类别, 最大可容忍延迟为 10 s, 依据表 3 的参数确认 3 种不同应用场景, 模拟 3 个覆盖类别, 分析不同场景下随机接入的平均时延。

表 3 场景定义

参 数	场景一	场景二	场景三
PRACH 重复周期/ms	40	320	2560
起始子帧位置/ms	8	64	1 024
前导码重复次数/次	1	32	128
最大接入尝试次数/次	3	6	10
前导码持续时间	8	8	8
响应窗口大小(pp)	2	5	10

3 种场景下平均接入时延的仿真结果如图 10—图 12 所示。由图可知, 重复和重传次数的增加都会导致平均接入时延增加, 3 种场景下平均接入时延分别约为 0.104, 1.32, 8.87 s, 对于参与随机接入过程的终端数量从 0 增加到可用信道数量的 3 倍时, 平均接入时延增长很快。当终端数量增长到 3 倍以上时, 平均接入时延的增加趋缓, 逐渐趋于一个稳定值, 且可用信道数量越多, 这种增长趋势越平稳, 相比于可用信道数量较少情况, 可以允许在相同终端数量下达到更低的接入时延。

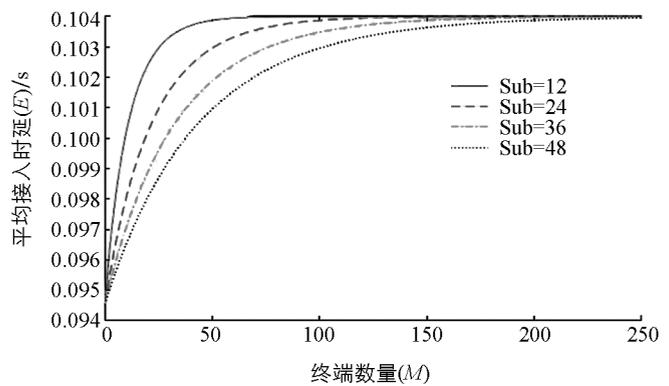


图 10 场景一的平均接入时延

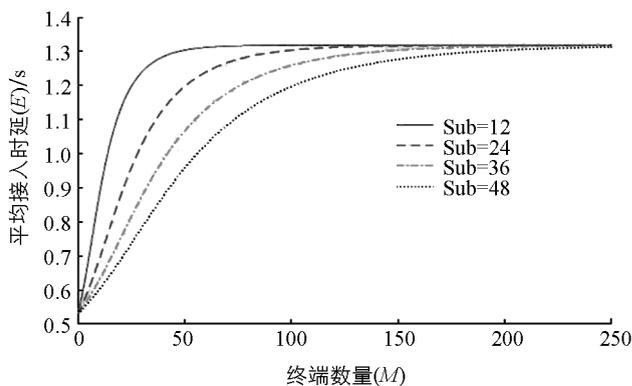


图 11 用场景二的平均接入时延

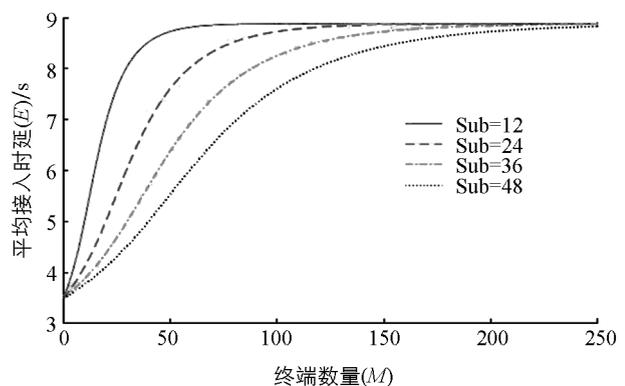


图 12 场景三的平均接入时延

4 结 论

本文针对随机分布在二维地理区域的 NB-IoT 终端和基站, 分析了重复和重传与随机接入成功率之间的关系, 建立了基于随机几何的前导码检测概率模型和基于多频段多信道时隙 ALOHA 协议的冲突概率模型。进一步考虑重复和重传次数对平均接入时延的影响, 导出了平均接入时延与重复和重传次数之间的关系, 并结合 NB-IoT 划分的覆盖类别进行了仿真。结果表明, 检测概率随前导码重复次数的增

加而增加,当重复次数为 8 时,检测概率可达 99%。但重复次数对随机接入成功率的影响不大,随机接入成功率随重传次数和可用信道数量的增加而增加;虽然重复和重传会导致平均接入时延增加,但针对 NB-IoT 划分的 3 个覆盖类别的仿真表明,即使是在极端恶劣的应用场景,平均接入时延也能满足规定的最大可容忍延迟要求。

参考文献:

- [1] 杨 杰,李 波. 物联网中感知数据路由传输机制研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(10): 171-174.
- [2] 刘 岩,徐俊杰,周 宇,等. 利用无线嵌入式物联网技术实现智能电力计量 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(11): 162-167.
- [3] 钟 健,杨 琼,高 薇. 物联网中可分级的大数据流动态调度算法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(9): 182-189.
- [4] 林聪伟,郭晓东,张卫青,等. 基于自动化生产线的物联网可视化监控系统 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(4): 123-129.
- [5] HOGLUND A, LIN X, LIBERG O, et al. Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT [J]. IEEE Network, 2017, 31(6): 16-22.
- [6] ANDRES-MALDONADO P, AMEIGEIRAS P, PRADOS-GARZON J, et al. Analytic Analysis of Narrowband IoT Coverage Enhancement Approaches [C] //2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS). June 4-7, 2018, Bilbao, Spain. IEEE, 2018: 1-6.
- [7] KIM T, KIM D M, PRATAS N, et al. An Enhanced Access Reservation Protocol with a Partial Preamble Transmission Mechanism in NB-IoT Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10): 2270-2273.
- [8] CHAFII M, BADER F, PALICOT J. Enhancing Coverage in Narrow Band-IoT Using Machine Learning [C]. 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). April 15-18, 2018, Barcelona, Spain. IEEE, 2018: 1-6.
- [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] GHARBIEH M, ELSAWY H, BADER A, et al. Spatiotemporal Stochastic Modeling of IoT Enabled Cellular Networks: Scalability and Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(8): 3585-3600.
- [11] 简 鑫,刘钰芬,韦一笑,等. 窄带物联网覆盖类别更新机制性能分析与优化 [J]. 通信学报, 2018, 39(11): 70-79.
- [12] AZARI A, MIAO G, STEFANOVIC C, et al. Latency-Energy Tradeoff based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems [C] //2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). December 9-13, 2018, Abu Dhabi United Arab Emirates. IEEE, 2018: 1-7.
- [13] YU C C, YU L, WU Y, et al. Uplink Scheduling and Link Adaptation for Narrowband Internet of Things Systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 1724-1734.
- [14] SUN Y Y, TONG F, ZHANG Z K, et al. Throughput Modeling and Analysis of Random Access in Narrow-band Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1485-1493.
- [15] OH S M, SHIN J. An Efficient Small Data Transmission Scheme in the 3GPP NB-IoT System [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 660-663.
- [16] JIANG N, DENG Y S, KANG X, et al. Random Access Analysis for Massive IoT Networks under a New Spatio-Temporal Model: A Stochastic Geometry Approach [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5788-5803.
- [17] WANG X M, YANG D, JIAN X. Performance Analysis and Optimization for Coverage Enhancement Strategy of Narrow-Band Internet of Things [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 101: 434-443.
- [18] HARWAHYU R, CHENG R G, WEI C H, et al. Optimization of Random Access Channel in NB-IoT [J]. IEEE Inter-

net of Things Journal, 2018, 5(1): 391-402.

- [19] BARACAT G H, BRITO J M. NB-IoT Random Access Procedure Analysis [C] //2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). November 14-16, 2018, Guadalajara Mexico. IEEE, 2018: 1-6.

Analysis of Narrow-Band IoT Coverage Enhancement Based on Repetition and Retransmission

ZHANG Yi-han¹, LI Peng¹, PU Dan²,
WANG Shi-qian¹, LI Hui-xuan¹, XIE An-bang¹

1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. College of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract: In NB-IoT (narrow band Internet of things), repetition and retransmission can enhance its coverage. For the randomly deployed terminals and base stations, a preamble detection probability model based on random geometry and a collision probability model based on multi-band and multi-channel slotted ALOHA are established to study the coverage enhancement of repetition and retransmission. The detection probability of the base station for the preamble and the competing success probability of terminal to channel are analyzed. The random access success rate and average access delay of the terminal are derived. A simulation analysis is carried out based on the 3 coverage categories of NB-IoT, and its results show that the detection probability increases with the repetition times, but the repetition times have no significant effect on the random access success rate. The random access success rate increases with the increase of retransmission times and the available channel numbers. The simulation results for the 3 coverage categories of NB-IoT show that the average access delay can meet the maximum tolerable delay requirement even in extremely severe application scenarios.

Key words: NB-IoT(narrow band Internet of things); coverage enhancement; detection probability; competing success probability; random access success rate

责任编辑 汤振金