

文章编号:1007-5321(2021)04-0109-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-264

泊松簇过程部署的窄带蜂窝物联网性能分析

王洪明¹, 姚媛媛¹, Wei Xiang², 李学华¹

(1. 北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 100101;

2. 澳大利亚乐卓博大学 工程和数学学院, 墨尔本 3086)

摘要: 针对窄带物联网(NB-IoT)与蜂窝移动网同频共存网络,借助随机几何理论工具,采用泊松簇过程建模 NB-IoT 用户节点位置,推导了异构网络上链路的的中断概率和用户传输容量的解析表达式,探究了簇半径以及 NB-IoT 基站部署密度对网络中断性能和用户传输容量的影响,对比了基于泊松点过程建模异构网络的中断性能. 理论分析和仿真结果表明,调整簇半径和 NB-IoT 基站的部署密度能够有效提升共存网络的中断性能和用户传输容量.

关键词: 窄带物联网; 蜂窝移动网络; 泊松簇过程; 中断概率

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Performance Analysis of Narrowband Internet of Things Deployed in Poisson Cluster Process

WANG Hong-ming¹, YAO Yuan-yuan¹, Wei Xiang², LI Xue-hua¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Information Science and Technol., Beijing 100101, China;

2. School of Engineering and Mathematics, La Trobe University, Melbourne 3086, Australia)

Abstract: The co-frequency coexistence design of narrowband Internet of things (NB-IoT) and cellular networks is studied. Based on the stochastic geometry theorem, the location of an NB-IoT user node is modeled by the Poisson cluster process. In addition, analytical expressions of the outage probability and the transmission capacity are derived. Moreover, the outage performance of the heterogeneous network is compared with that of the network modeled by Poisson point process. The impacts of the cluster radius and the density of NB-IoT base stations on the outage performance and the network capacity are also evaluated. Analytical and numerical results demonstrate that the outage performance and the capacity of the coexistence network can be effectively enhanced by adjusting the cluster radius and the density of NB-IoT base stations.

Key words: narrowband Internet of things; cellular mobile network; Poisson cluster process; outage probability

随着移动数据流量呈指数增长^[1],单一的蜂窝 移动网络无法满足海量的设备接入,导致无线资源

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L192022, L182032, L182039); 北京市自然科学基金-市教委联合项目(KZ201911232046); 北京市教委科研计划项目(KM202011232002); 泛网无线通信教育部重点实验室项目(BUPT)(KFKT-2020105)

作者简介: 王洪明(1996—),女,硕士生.

通信作者: Wei Xiang(1975—),男,教授, E-mail: w. xiang@latrobe. edu. au.

利用率低. 窄物联网(NB-IoT, narrowband Internet of things)具备广域覆盖、超低功耗和超低成本等优势^[2]. 第3代合作伙伴计划标准(第13版)提出了基于蜂窝的窄带物联网^[3], 运营商通过增加 NB-IoT 微基站, 将其与长期演进(LTE, long term evolution)宏基站结合, 以提高频谱的利用率^[4]. 因此 NB-IoT 与蜂窝移动网络同频共存可以为未来海量设备接入和资源管控提供一种解决思路.

在现有的研究中, Malik 等^[5]对 NB-IoT 独立部署在 LTE 的场景进行了分析, 结果表明, 独立部署情况的平均吞吐量提高达 66%. Kim 等^[6]分析了 NB-IoT 带内部署和保护带部署的性能, 结果表明, 保护带部署的性能高于带内部署. Gbadamosi 等^[7]介绍了 NB-IoT 与蜂窝网络的潜在架构部署方案, 但是没有提出可行的共存模型. Mozaffari 等^[8]通过使用网格对齐的方式解决了 NB-IoT 和第 5 代移动通信系统共存的干扰问题. Alexandre 等^[9]通过使用 Keysight 科技提供的仪器在 700 MHz 频带中成功演示了使用 10 MHz 带宽部署多种技术的同频道场景. Kumar 等^[10]通过使用无线电和系统模块实现 NB-IoT 独立部署, 捕获吞吐量和覆盖级别, 以验证 NB-IoT 规范.

以上研究没有建立 NB-IoT 与蜂窝网络同频组网的具体共存模型. 基于第 3 代合作伙伴计划标准的仿真模型, 采用泊松点过程 (PPP, Poisson point process) 模型和泊松簇过程 (PCP, Poisson cluster process) 模型对用户的位置进行建模的方法在过去几年中受到了广泛的关注. 焦铭晗等^[11]采用 PPP 的方法分别对无人机和用户的位置建模, 以研究无人机网络下行链路的网络覆盖及切换性能. 为此, 笔者建立了一种基于 PCP 模型的 NB-IoT 与蜂窝移动网络宏微共存系统模型, 采用 PCP 模型对 NB-IoT 基站和 NB-IoT 用户建模, 分析上行链路的中断概率和用户传输容量. 分析结果表明, 与 PPP 模型相比较, PCP 模型能更好地反映现实的部署情况, 此外, 通过调整簇半径和 NB-IoT 基站分布密度可以优化网络的中断性能并增加用户的传输容量.

1 系统模型

1.1 网络模型

如图 1 中的 (a) 所示, 采用 PPP 模型对 NB-IoT 系统和蜂窝移动用户建模, NB-IoT 基站和用户均遵循 PPP 模型建模, 彼此独立, 这种方法提高了分析

的灵活性, 但事实上, 用户设备更可能聚集在 NB-IoT 基站周围, 故可采用基于 PCP 模型的建模方法, 如图 1 (b) 所示. 聚类中心 NB-IoT 基站的位置建模为 PPP 模型, 密度为 λ_b , 每个父节点 F_i 形成一个簇中心, NB-IoT 的用户作为子节点均匀地分布在半径为 a 的圆内, 形成密度为 λ_u 的 PCP 模型 ϕ_b , 蜂窝移动用户的位置被建模成密度为 λ_c 的 PPP 模型.

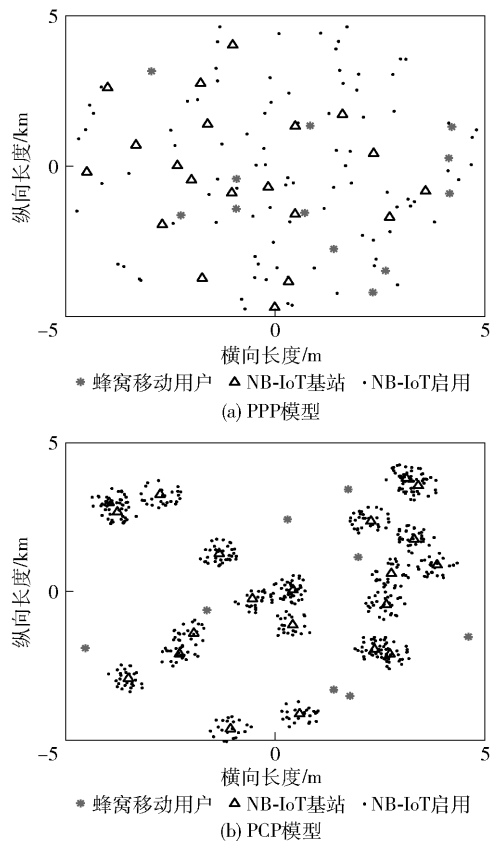


图1 PPP模型和PCP模型对比

为了简化分析步骤, 假设目标基站 (BS, base station) 位于坐标原点, 任意一个 NB-IoT 用户到 NB-IoT 基站距离 r 的概率密度函数为

$$f(r) = \begin{cases} \frac{2r}{a^2}, & r \leq a \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 信道和干扰模型

图 2 所示为 NB-IoT 与蜂窝移动网络同频部署上行链路干扰模型, 假设其中每一个 NB-IoT 基站覆盖的区域内有 n 个 NB-IoT 用户, 采用理想的高斯加性噪声信道, 噪声功率为 σ^2 . NB-IoT 用户上传信息, 在上行链路中的传播受到路径衰落的影响, 常数 α 表示路径损耗, 且 $\alpha > 2$. 此外, NB-IoT 基站接收 NB-IoT 用户传送的数据时会受到瑞利衰落的影响,

传输信道呈参数为1的指数分布. 在 t 时刻, NB-IoT 基站覆盖小区的 NB-IoT 用户1 (BS 覆盖范围内的 UE_1) 与 BS 相邻小区 (BS_1 、 BS_2) 覆盖区域内的 UE_1 同时上传信息, BS 会收到来自相邻小区 NB-IoT 用户的干扰, 除此之外, 假设蜂窝移动用户与 UE_1 在同一个信道上传输, BS 还会接收到来自蜂窝移动用户的干扰.

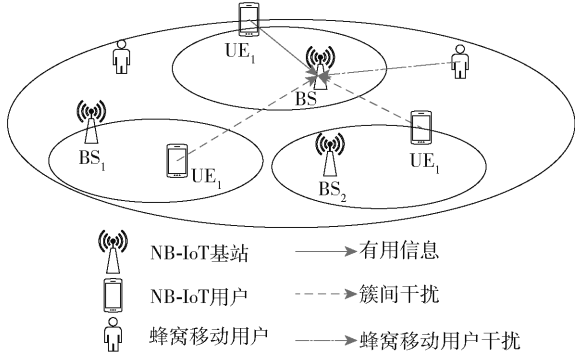


图2 NB-IoT 与蜂窝移动网络同频部署上行链路干扰模型

假设第 i 个用户上传数据的功率为 p_i , 目标 BS 接收到覆盖区域内 UE_1 的功率为

$$S = p_i h_{x_1} \|x\|^{-\alpha} \quad (2)$$

其中: h_{x_1} 为 UE_1 的传输信道, $\|x\|$ 为 UE_1 与目标 BS 之间的欧式距离.

来自其他 NB-IoT 小区用户设备的干扰可以表示为

$$I_u = \sum_{y \in \Phi_{b/x}} p_i h_{y_1} \|y\|^{-\alpha} \quad (3)$$

其中: h_{y_1} 为目标基站 BS 覆盖区域内 UE_1 以外其他小区 UE_1 的传输信道, $\|y\|$ 为 UE_1 与目标基站 BS 之间的欧式距离.

来自蜂窝移动用户的干扰可以表示为

$$I_c = \sum_{z \in \Phi_c} p_i h_z \|z\|^{-\alpha} \quad (4)$$

其中: h_z 为蜂窝移动用户的传输信道, $\|z\|$ 为蜂窝移动用户与目标 BS 之间的欧式距离.

目标 BS 处接收到的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 为

$$R_i = \frac{S}{I_u + I_c + \sigma^2} \quad (5)$$

2 中断概率与用户传输容量性能分析

2.1 中断概率

采用最大信干噪比准则, 当 NB-IoT 基站接收到的 SINR 小于 NB-IoT 基站处信干噪比阈值 β 时, 认

为该 NB-IoT 用户不能与 NB-IoT 基站进行正常通信. 定义 NB-IoT 和蜂窝移动网同频共存网络的中断概率为

$$P_{out} = \Pr \{R_i < \beta\} \quad (6)$$

定理 1 NB-IoT 和蜂窝移动网同频共存网络的平均中断概率为

$$P_{out} = 1 - \frac{2}{a^2} \int_0^a \exp(-s\sigma^2) \times \exp(-\pi\lambda_b \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (sp_i)^\delta) \times \exp(-\pi\lambda_c \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (sp_i)^\delta) r dr \quad (7)$$

其中: $s = \frac{\beta r^{-\alpha}}{p_i}$, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数. 可以看出, 中断概率与 NB-IoT 基站密度以及 NB-IoT 基站的覆盖半径有关.

证明 由式(5)可得, NB-IoT 基站收到的 SINR 与用户到 NB-IoT 基站的距离有关, 根据平均中断概率的定义可得

$$P_{out} = E[\Pr\{R_i < \beta | r\}] = 1 - E[\Pr\{R_i \geq \beta | r\}] = 1 - \int_0^a \Pr\{R_i \geq \beta | r\} f(r) dr \quad (8)$$

将式(1)和式(5)代入式(8)可以得到

$$P_{out} = 1 - \int_0^a \Pr\left\{\frac{p_i h_{x_1} \|x\|^{-\alpha}}{I_u + I_c + \sigma^2} \geq \beta \mid r\right\} \frac{2r}{a} dr = 1 - \frac{2}{a} \int_0^a \Pr\left\{h_{x_1} \geq \frac{\beta \|x\|^\alpha}{p_i} (I_u + I_c + \sigma^2) \mid r\right\} r dr \quad (9)$$

根据条件期望的定义, 可以将式(9)中的

$$\Pr\left\{h_{x_1} \geq \frac{\beta \|x\|^\alpha}{p_i} (I_u + I_c + \sigma^2) \mid r\right\}$$

改写为

$$\begin{aligned} & \Pr\left\{h_{x_1} \geq \frac{\beta \|x\|^\alpha}{p_i} (I_u + I_c + \sigma^2) \mid r\right\} = \\ & E\left[\Pr\left\{h_{x_1} \geq \frac{\beta \|x\|^\alpha}{p_i} (I_u + I_c + \sigma^2) \mid r\right\}\right] = \\ & E\left[\exp\left(-\frac{\beta r^\alpha}{p_i} \sigma^2\right) \exp\left(-\frac{\beta r^\alpha}{p_i} (I_u + I_c)\right)\right] = \\ & \exp(-s\sigma^2) \mathcal{L}_{I_u}(s) \mathcal{L}_{I_c}(s) \end{aligned} \quad (10)$$

$\mathcal{L}_{I_u}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_c}(s)$ 分别代表干扰 I_u 和干扰 I_c 的拉普拉斯变换. 由拉普拉斯变换的定义可以得到

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}_{I_u}(s) = \\ & E\left[\prod_{y \in \Phi_{b/x}} \exp\left(-s \sum_{y \in \Phi_{b/x}} p_i h_{y_1} \|y\|^{-\alpha}\right)\right] = \\ & E\left[\prod_{y \in \Phi_{b/x}} E_{h_N} \exp\left(-s \sum_{y \in \Phi_{b/x}} p_i h_{y_1} \|y\|^{-\alpha}\right)\right] =^{(a)} \end{aligned}$$

$$E \left[\prod_{y \in \Phi_{b/x}} \frac{1}{1 + sp_i h_{y_1} \|y\|^{-\alpha}} \right]^{(b)} = \exp \left(-2\pi\lambda_b \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + sp_i r^{-\alpha}} \right) r dr \right) \quad (11)$$

步骤(a)可通过 h_N 服从均值为 1 的瑞利分布获得,步骤(b)可将笛卡儿坐标转化为极坐标,式(11)可以化简为

$$\exp \left(-2\pi\lambda_b \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + sp_i r^{-\alpha}} \right) r dr \right) = \exp \left(-2\pi\lambda_b \int_0^\infty \frac{sp_i r^{1-\alpha}}{1 + sp_i r^{-\alpha}} dr \right) \quad (12)$$

进一步转化可以得到 $\mathcal{L}_{I_u}(s)$ 的表达式:

$$\mathcal{L}_{I_u}(s) = \exp \left[-\pi\lambda_b \Gamma(1-\delta) \Gamma(1+\delta) (sp_i)^\delta \right] \quad (13)$$

其中 $\delta = \frac{2}{\alpha}$. 用同样的方法可以得到 I_c 的拉普拉斯变换为

$$\mathcal{L}_{I_u}(s) = E \left[\prod_{z \in \Phi_u} \exp \left(-s \sum_{z \in \Phi_u} p_i h_z \|z\|^{-\alpha} \right) \right] = \exp \left[-\pi\lambda_u \Gamma(1-\delta) \Gamma(1+\delta) (sp_i)^\delta \right] \quad (14)$$

将式(13)和式(14)代入式(10)中,可以得到式(7).

2.2 用户传输容量

依据香农定理,在任意时刻中断概率的作用下,用户传输成功的数量为用户的传输容量,有

$$C = B(1 - P_{\text{out}}) \lg \left(1 + \frac{S}{I_u + I_c + \sigma^2} \right) \quad (15)$$

其中 B 为传输带宽. 将式(5)和式(7)代入式(15)可以得到用户的传输容量为

$$C = \frac{2B}{a^2} \lg \left(1 + \frac{p_i h_{x_1} \|x\|^{-\alpha}}{I_u + I_c + \sigma^2} \right) \int_0^a \exp(-s\sigma^2) \times \exp(-\pi\lambda_b \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (sp_i)^\delta) \times \exp(-\pi\lambda_u \Gamma(1+\delta) \Gamma(1-\delta) (sp_i)^\delta) dr \quad (16)$$

可以看出,用户的传输容量与 NB-IoT 基站覆盖半径 a 以及 NB-IoT 基站的分布密度有关.

3 仿真结果与分析

在给定区域内对 NB-IoT 与蜂窝移动网络共存系统性能进行仿真,以验证理论分析的正确性. 在建立的模型中,忽略了系统噪声的影响,对蜂窝移动用户、NB-IoT 基站和 NB-IoT 用户在半径为 10 km 的区域内进行撒点,仿真结果由 10^6 次撒点仿真平均后得到,参数设置如表 1 所示.

表 1 基本仿真参数设置

参数	取值
传输带宽 B/kHz	180
工作频段/MHz	900
路径损耗因子 α	3
用户发射功率 p_i/dBm	16
NB-IoT 基站密度 λ_b/km^{-3}	$10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}$
蜂窝移动用户密度 λ_c/km^{-3}	10^{-6}
NB-IoT 基站阈值 β/dB	0 ~ 20
簇半径 a/m	600, 800, 1 000, 2 000

图 3 所示为不同簇半径状态下中断概率的变化趋势. 可以看出,仿真结果与理论分析结果完全一致;其次,通过对 4 种不同簇半径情况的仿真实验结果可知,簇半径较小时中断概率较小;当簇半径为 2 km 时,更容易发生中断,因此,若将中断性能作为首要需求,需要将 NB-IoT 基站覆盖半径控制在一定范围内. 从仿真分析结果可见,簇半径较小时,通信距离变小,减小了簇间的干扰,从而减小了通信发生中断的情况. 此外,当簇半径为 600 m 时,采用 PCP 模型的系统中断性能比基于 PPP 模型分布的网络模型的系统中断性能提高了 40%.

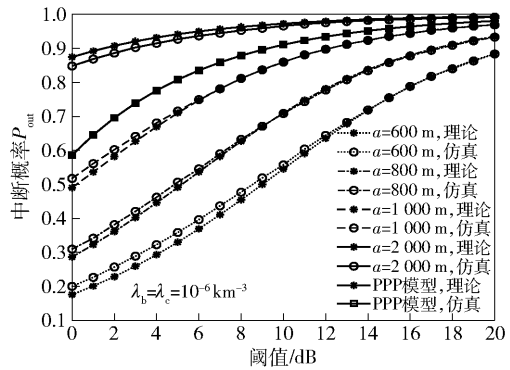


图 3 中断概率与簇半径的关系

图 4 所示为不同 NB-IoT 基站密度的状态下中断概率的变化趋势. 通过对 3 种不同 NB-IoT 基站密度情况的仿真实验结果可知,NB-IoT 基站密度较小时中断概率较小;当 NB-IoT 基站密度为 10^{-5} km^{-3} 时,网络基本是中断状态. 因此,若将中断性能作为首要需求,应将 NB-IoT 基站密度控制在较低水平. 基于仿真分析结果,NB-IoT 基站密度较小时,撒点数目变小,从而减小了簇间干扰,降低了系统通信中断性能. 除此之外,从图 4 可以看出,基于 PPP 模型的网络中断概率集中在 0.7 ~ 0.9 范围内,所提模型在 NB-IoT 基站密度为 10^{-7} km^{-3} 时的中断概率在 0.2 ~ 0.9 范围内,中断性能提升了 33.5%.

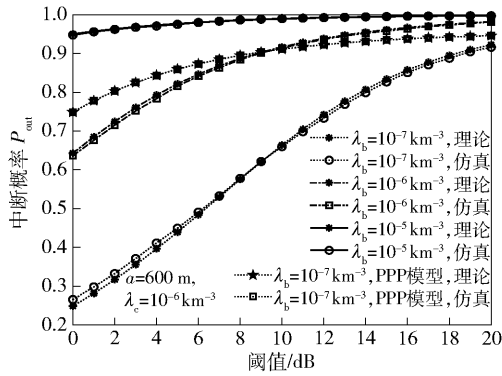


图4 中断概率与 NB-IoT 基站密度的关系

图5所示为用户传输容量随着 SINR 阈值和簇半径的变化趋势。可以看出, SINR 阈值取 10 dB, 同时簇半径较小时, 用户的传输容量达到最大值。若将用户的传输容量作为衡量网络的首要指标, 要选取合适的阈值和较小的簇半径。基于仿真分析结果, SINR 阈值一定时, 随着簇半径变大, 撒点数目变多, 中断概率变大, 削弱了网络的覆盖能力, 影响用户传输成功的数量变小; 当簇半径一定时, 用户的传输容量随着 SINR 阈值的增大逐渐增大, 到达某一值时开始减小。由于中断概率随着阈值的增加而增加, 导致成功传输的功率变小, 而对数函数是一个递增函数, 用户传输容量在阈值为 10 dB 时可取得最大值。

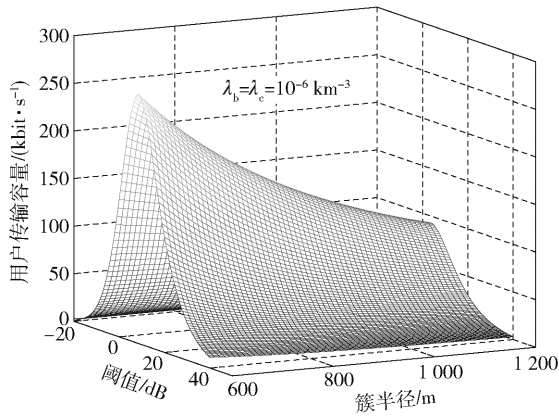


图5 用户传输容量与 SINR 阈值和簇半径的三维图

图6所示为用户传输容量与 SINR 阈值和密度的关系。SINR 阈值取 10 dB, NB-IoT 基站密度较小时, 用户的传输容量达到最大值。基于仿真分析结果, 当 SINR 阈值一定时, 随着 NB-IoT 基站密度的增大, 撒点数目增加, 干扰变大, 从而平均中断概率变大, 缩小了覆盖范围, 导致用户传输成功的数量变小, 最终减小了用户传输容量; 当 NB-IoT 基站密度

一定时, 随着 SINR 阈值的增大, 用户的传输容量先增加, 达到最高点后再减少。因为中断概率随着阈值的增加而增加, 导致成功传输的概率变小; 然而, 对数函数是一个递增函数, 存在一个 SINR 阈值使用户传输容量最大。

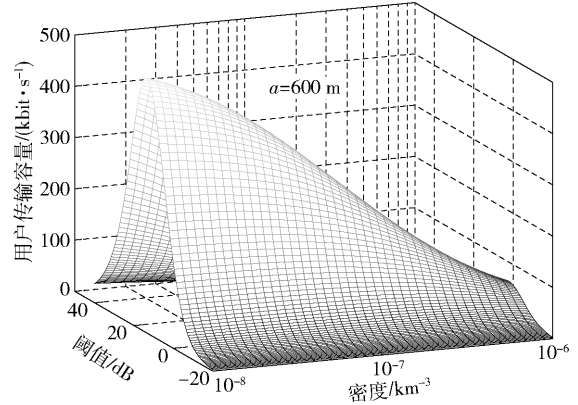


图6 用户传输容量与 SINR 阈值和密度的三维图

图7所示为 PPP 和 PCP 模型下用户传输容量的对比。仿真结果显示, PPP 模型下用户容量的最大值为 74.43 Kbit/s, PCP 模型下用户传输容量的最大值为 258.3 Kbit/s, 与 PPP 模型对比, PCP 模型下用户传输的容量提高了约 70%。

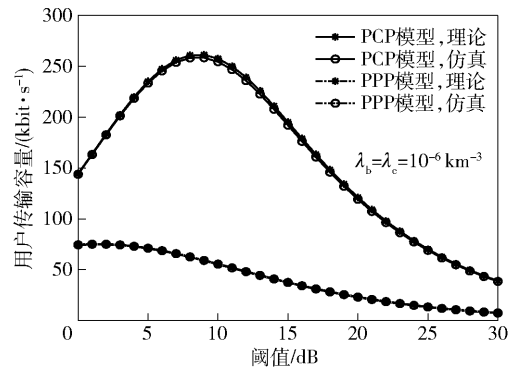


图7 PPP 和 PCP 用户传输容量对比

4 结束语

建立了基于 PCP 模型下分布的 NB-IoT 与蜂窝网络同频共存模型, 推导了中断概率和用户传输容量的表达式, 并进行了蒙特卡洛仿真验证。仿真结果显示, 与 PPP 模型相比, 建立的 PCP 模型更加符合现实的部署, 选取合适的 NB-IoT 基站覆盖半径和 NB-IoT 基站分布密度可以将共存网络的中断性能提高 40%, 从而增加用户传输容量, 对 NB-IoT 的实际部署具有指导意义。

参考文献:

- [1] 易芝玲, 王森, 韩双锋, 等. 从5G到6G的思考: 需求、挑战与技术发展趋势[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(2): 1-9.
Yi Zhiling, Wang Sen, Han Shuangfeng, et al. From 5G to 6G: requirements, challenges and technical trends[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(2): 1-9.
- [2] Migabo E M, Djouani K D, Kurien A M. The narrow-band Internet of things (NB-IoT) resources management performance state of art, challenges and opportunities[J]. IEEE Access, 2020, 8: 97658-97675.
- [3] 范继, 毋丹芳, 刘晓旭. NB-IoT场景下业务数据碎片化现象研究与优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(10): 286-290, 296.
Fan Ji, Wu Danfang, Liu Xiaoxu. Business data fragmentation and optimization in NB-IoT[J]. Computer Simulation, 2020, 37(10): 286-290, 296.
- [4] Zakariyya R S, Jewel K H, Fadamiro A O, et al. An efficient polar coding scheme for uplink data transmission in narrowband Internet of things systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 191472-191481.
- [5] Malik H, Sarmiento J L R, Alam M M, et al. Narrow-band-Internet of things (NB-IoT): performance evaluation in 5G heterogeneous wireless networks[C]//2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). Limassol: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [6] Kim H, Cho S C, Lee Y, et al. Performance analysis of NB-IoT system according to operation mode[C]//2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju: IEEE Press, 2019: 876-878.
- [7] Gbadamosi S A, Hancke G P, Abu-Mahfouz A M. Building upon NB-IoT networks: a roadmap towards 5G new radio networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 188641-188672.
- [8] Mozaffari M, Wang Y P E, Liberg O, et al. Flexible and efficient deployment of NB-IoT and LTE-MTC in coexistence with 5G new radio[C]//IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Paris: IEEE Press, 2019: 391-396.
- [9] Alexandre L C, de Souza Filho A L, Sodré A C. Indoor coexistence analysis among 5G new radio, LTE-A and NB-IoT in the 700 MHz band[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135000-135010.
- [10] Kumar M R S, Shushrutha K S. Implementation and performance analysis of NB-IoT in LTE[C]//2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kharagpur: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [11] 焦铭晗, 彭木根, 刘晨熙. 无人机网络的覆盖及切换性能研究[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 74-81.
Jiao Minghan, Peng Mugen, Liu Chenxi. Research on coverage and handover performance of unmanned aerial vehicle network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 74-81.