



基于泊松簇过程的毫米波异构网络频谱分析

陈玉宛¹, 贾向东^{1,2}, 纪澎善¹, 吕亚平¹

(1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院, 兰州 730070; 2. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 南京 210003)

摘 要: 针对大规模热点通信场景中用户设备(UE)和基站空间的相关性描述问题, 构建基于泊松簇过程的毫米波异构网络模型, 并提出一种基于微微基站(PBS)最近距离比的 UE 簇分类方案。根据毫米波传输模型和路径损耗模型, 由随机几何理论推导毫米波异构网络中 UE 簇的级联概率和下行链路(DL)频谱效率的表达式。分析发射功率、UE 簇分类因子、PBS 分布最大值对级联概率的影响, 并比较泊松簇分布用户和传统泊松点均匀分布用户的频谱效率。仿真结果表明, 与传统的基于泊松点过程的网络模型相比, 该方案明显提高了系统模型的 DL 频谱效率。

关键词: 异构网络; 毫米波; 泊松簇过程; 级联概率; 频谱效率

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 陈玉宛, 贾向东, 纪澎善, 等. 基于泊松簇过程的毫米波异构网络频谱分析[J]. 计算机工程, 2020, 46(11): 194-200.

英文引用格式: CHEN Yuwan, JIA Xiangdong, JI Pengshan, et al. Spectrum analysis of millimeter wave heterogeneous network based on poisson cluster process[J]. Computer Engineering, 2020, 46(11): 194-200.

Spectrum Analysis of Millimeter Wave Heterogeneous Network Based on Poisson Cluster Process

CHEN Yuwan¹, JIA Xiangdong^{1,2}, JI Pengshan¹, LÜ Yaping¹

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

[Abstract] To address the problem of describing the correlation between User Equipment(UE) and base station space in large-scale hot spot communication scenarios, this paper constructs a millimeter wave heterogeneous network model based on Poisson Cluster Process(PCP), and proposes a UE cluster classification scheme based on the nearest distance ratio of the Pico Base Station(PBS). According to the millimeter wave transmission model and path loss model, the expressions of the association probability of the UE cluster and the spectral efficiency of Down Links(DL) in millimeter wave heterogeneous networks are derived from the random geometry theory. The influence of transmission power, classification factor of UE cluster, maximum of PBS distribution on the association probability is analyzed, and the spectrum efficiency of users with Poisson cluster distribution and users with traditional Poisson point uniform distribution is compared. Simulation results show that compared with the traditional network model based on the Poisson Point Process(PPP), the proposed scheme significantly improves the DL spectral efficiency of the system model.

[Key words] heterogeneous network; millimeter wave; Poisson Cluster Process(PCP); association probability; spectral efficiency

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0056001

0 概述

无线数据业务流量的指数级增长和频谱资源的短缺, 推动了新的无线通信网络技术的发展。为满足日益增长的网络吞吐量的需求, 必须考虑新技术

来设计下一代 5G 蜂窝网络。工业界和学术界普遍认为, 异构网络(Heterogeneous Networks, HetNets)和毫米波(mm-Wave)是未来 5G 蜂窝网络容量增长的两项关键技术^[1]。

高通公司定义 HetNets^[2], 其由宏小区和具有低

基金项目: 国家自然科学基金(61261015, 61561043); 甘肃省科技计划项目(18YF1GA060)。

作者简介: 陈玉宛(1994—), 女, 硕士研究生, 主研方向为无线通信技术; 贾向东, 教授、博士、博士后; 纪澎善、吕亚平, 硕士研究生。

收稿日期: 2019-09-12 **修回日期:** 2019-10-25 **E-mail:** 1256373765@qq.com

发射功率的小小区共同组成。低功耗小型基站的部署,可以提高系统网络容量,增强覆盖范围并消除覆盖盲点^[3]。此外,由于 HetNets 的不规则性和异构性日益增加,为了提供一个系统级的分析框架,随机空间模型、统计几何和点过程理论工具被用于精确建模和简化分析^[4-5]。目前最流行的方法是将 HetNets 建模为多层独立泊松点过程 (Poisson Point Process, PPP) 的叠加网络^[6],其中每层由不同类型的基站 (Base Station, BS) 构成。该方案的网络节点在空间上呈均匀分布,因此没有充分利用 5G 网络的异构特性。网络元素异构部署的直接后果是在 BS 和用户设备 (User Equipment, UE) 的位置上出现了不同类型的空间耦合^[7],所以 PPP 建模不能为上述条件下的干扰提供准确的模型。因此,根据热点形成与 UE-BS 耦合的潜在联系,文献[8]利用泊松簇过程 (Poisson Cluster Process, PCP) 对 UE 分布进行建模和分析^[9]。

在大规模热点区域中,随着热点的增加,BS 的数量也随之增加。特别是每个簇中 UE 的级联很大程度上依赖于其所在位置。在不同的位置,目标 UE 可能与不同的 BS 相级联,UE 性能取决于其位置^[10]。基于这些考虑,文献[11]结合部分频率复用 (Fractional Frequency Reuse, FFR) 和 UE 分类进行研究分析,然而该方案仅对基于网格的蜂窝网络有效。为克服该问题,文献[12]将该方法推广到基于随机的两层异构网络,并根据信干扰加噪声比 (Signal-to-Interference-Noise Ratio, SINR) 阈值对蜂窝网络中的 UE 进行分类。考虑到基于 SINR 的分类方法会导致目标用户频繁地在中心用户和边缘用户之间切换,文献[13]提出了基于距离比的分析方案。

本文提出一种基于 PCP 的建模方案,该方案将用户热点的地理中心建模为独立的 PPP,其周围的 UE、微微基站 (Pico Base Station, PBS) 和毫微微基站 (Femto Base Station, FBS) 是分散的,从而形成独立的、非齐次的 PCP。利用目标 UE 与 PBS 之间的第一和第二最近距离之比对 UE 簇进行分类,结合随机几何的方法,推导目标 UE 的级联概率和下行链路 (Downlink, DL) 的频谱效率,并分析发射功率、UE 簇分类因子、PBS 分布最大值对级联概率的影响。

1 系统模型与信道假设

1.1 系统模型

本文考虑一个由大功率 PBS 和小功率、短距离 FBS 组成的两层异构蜂窝网络,假设每层的 BS 作为独立的 PCP 分布。根据以下定义,PBS 的位置由托马斯簇过程 (Thomas Cluster Process, TCP) $\Phi_{\text{TCP}}^P(\lambda_c, M_P, \bar{c}_P)$ 建模,FBS 的位置由另一个 TCP Φ_{TCP}^F

($\lambda_c, M_F, \bar{c}_F$) 建模。这 2 个 TCP 有共同的父过程 $\Phi_c(\lambda_c)$,该父过程是一个稳定的 PPP。虽然子过程 $\Phi_{\text{TCP}}^P(\cdot)$ 和 $\Phi_{\text{TCP}}^F(\cdot)$ 分散在共同的父过程 $x \in \Phi_c$ 周围,但由于 PBS 和 FBS 之间的异质性, M_H 和 \bar{c}_H 的值是不同的, $H \in \{P, F\}$ 。这使得簇过程 $\Phi_{\text{TCP}}^P(\cdot)$ 和 $\Phi_{\text{TCP}}^F(\cdot)$ 的密度分别为 $\lambda_c \bar{c}_P$ 和 $\lambda_c \bar{c}_F$ 。此外,本文分别用 N_P^x 和 N_F^x 表示以 $x \in \Phi_c$ 为中心的 PBS 和 FBS 集合。相应地,活动 PBS 和 FBS 的集合分别表示为 S_P^x 和 S_F^x 。随机分布的移动 UE 被建模为密度 λ_U ($\lambda_U \gg \lambda_c$) 的 PCP。不失一般性,本文随机选择一个 UE 作为目标用户,为便于分析,假设目标 UE 位于代表簇 $x_0 \in \Phi_c$ 的中心原点 O 处。

本文为实现系统建模所采用的两种簇过程的定义如下:

定义 1 (泊松簇过程) 通过将齐次独立簇应用于稳定的 PPP,可以正式生成泊松簇过程。特别地,将父点过程的位置建模为密度 λ_c 的稳定 PPP Φ_c 。然后,对于给定的父点 $x \in \Phi_c$,子点 N_H^x 表示 BS 或 UE 的点的集合,它们分散在呈独立同分布的父点周围。因此,完整的 PCP 可被视为女儿联合体,并表示为:

$$\Phi^H = \bigcup_{x \in \Phi_c} N_H^x \quad (1)$$

注意,父点不包含在 PCP 中。聚类 N_H^x 的父点和女儿节点分别称为簇中心和簇成员。

定义 2 (托马斯簇过程) 托马斯簇过程是 PCP 的一个特例,假设簇成员根据一个方差为 σ_P^2 的相同且对称的正态分布独立地分散在父点 $x \in \Phi_c$ 的周围。位于代表簇中 $y \in \mathbb{R}^2$ 处的簇成员密度分布由式(2)得出:

$$f_Y(y) = \frac{1}{2\pi\sigma_P^2} \exp\left(-\frac{\|y\|^2}{2\sigma_P^2}\right) \quad (2)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数。为了便于分析,本文假设每个簇中的成员数量相同为 M_H ,用集合 N_H^x , $x \in \Phi_c$ 表示。虽然每个簇中的成员数量是固定的,但同时活动的成员数量不同,这被假定为一个平均值为 \bar{c}_H 的泊松分布变量,用 S_H^x ($x \in \Phi_c, S_H^x \subseteq N_H^x$) 表示。为了简化分析,本文使用 $\Phi_{\text{TCP}}^H(\lambda_c, M_H, \bar{c}_H)$ 表示 TCP,其中 λ_c 是父 PPP Φ_c 的密度,并且取决于具体的子点过程 N_H^x ($x \in \Phi_c$)。

1.2 传输模型

在毫米波异构网络中,信道增益与终端空间点过程无关。在该模型中所有网络终端 (PBS、FBS 和 UE) 均配备多个天线。为了简化分析,本文利用扇形模型对实际波形进行近似^[14]。其中发射机和接收机的天线阵增益由 3 个值参数化:1) 主瓣增益 M_s ; 2) 旁瓣增益 m_s ($M > m$); 3) 主瓣波束宽度 $\theta_s \in$

$[0, 2\pi] (s \in \{T, r\})$, $s = T (T \in \{P, F\})$ 表示发射天线, $s = r$ 表示 UE 的接收天线。假定使用估计的到达角, 在每个接收器及其发射器之间实现完美的光束对准。发射机 T 和接收机 UE 之间的总天线阵增益 $G'_T \times G'_U$ 可以表示为一个离散的随机变量, 关于值 a_{Ti} 的波束增益概率 $b_{Ti} (i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 如表 1 所示。

表 1 天线增益 $G'_T \times G'_U (T \in \{P, F\})$ 的值及概率
Table 1 Value and probability of antenna gain
 $G'_T \times G'_U (T \in \{P, F\})$

i	a_{Ti}	b_{Ti}
1	$M_{Ti}M_r$	$\frac{\theta_{Ti}}{2\pi} \times \frac{\theta_r}{2\pi}$
2	$m_{Ti}M_r$	$\left(1 - \frac{\theta_{Ti}}{2\pi}\right) \frac{\theta_r}{2\pi}$
3	$M_{Ti}m_r$	$\frac{\theta_{Ti}}{2\pi} \left(1 - \frac{\theta_r}{2\pi}\right)$
4	$m_{Ti}m_r$	$\left(1 - \frac{\theta_{Ti}}{2\pi}\right) \left(1 - \frac{\theta_r}{2\pi}\right)$

由于定向波束形成增益较大, 本文仅考虑所有无线信号在忽略小尺度衰落的情况下受到较大的路径损耗效应^[15]。由于毫米波的一个显著特点是容易受到障碍物的干扰, 对于大规模的路径损耗, 本文引入视距 (Line of Sight, LoS) 球来模拟阻塞^[16]。在该阻塞模型中, 定义视距球半径为 μ , 即 UE 与其附近阻塞之间的平均距离。特别地, 有且只有当发射器的通信链路距离 r 小于视距球半径 μ 时, 接收器才会认为该发射器是视距, 否则, 该发射器是非视距 (Non Line of Sight, NLoS)。根据上述模型, 得出通信距离为 r 的路径损耗定律为:

$$L(r) = U(\mu - r) C_L r^{-\alpha_L} + U(r - \mu) C_N r^{-\alpha_N} \quad (3)$$

其中, C_k 是截距, α_k 是路径损耗指数, $k = L$ 和 N 分别表示视距和非视距链路, $U(\cdot)$ 是单位阶跃函数。

1.3 簇分类方法

在 PBS 和 FBS 簇中, UE 会遇到更严重的簇内干扰, 从而使性能大大降低。为克服这一问题, 本文提出了一种有效的干扰管理方案, 即根据 UE 到 PBS (而不是 FBS) 的第一和第二最近距离比对 UE 簇进行分类。

本文重点研究位于代表簇 $x_0 \in \Phi_c$ 中目标 UE 的位置分类, PBS 簇表示为 $N_p^{x_0}$ 。将一个簇划分为 2 个不相交的子区域, 即簇中心区域和簇边缘区域。簇中心区域是指与主要干扰 PBS 相比, UE 与其服务 PBS 的距离较小的区域, 否则 UE 位于簇边缘区域。在代表簇 Φ_{TCP}^P 中, 如果满足 $r_{op}^e/r_{op}^d > \xi (\xi \in [0, 1])$, 则将目标 UE 归为簇边缘用户设备 (Cluster Edge User Equipment, CEUE), 否则将其归为簇中心用户设备 (Cluster Centre User Equipment,

CCUE), r_{op}^e 和 r_{op}^d 是目标 UE 与 PBS 之间最近的第一和第二距离。

为同时满足 Φ_{TCP}^P 中的 CEUE 和 CCUE, 提高整个系统吞吐量 (频谱效率), 本文将 FFR 技术和 UE 簇分类相结合。特别地, 整个频谱带宽 W 被划分为 2 个正交子带 W_1 和 W_2 , 且 $W = W_1 + W_2$ 。在 Φ_{TCP}^P 中, CCUE 使用子带 W_1 , CEUE 占用子带 W_2 。然而, 对于 Φ_{TCP}^F 中的 FBS, 考虑一种改进的 FFR 方案, 即部分 FBS 采用接入因子 η 随机使用子带 W_2 , 剩余的 FBS 根据接入因子 $1 - \eta$ 使用子带 W_1 。此外, 当 $\eta = 0$ 或 $\eta = 1$ 时, 子带 W_2 或 W_1 被所有的 FBS 共享, 该方案优势将减少, 相当于传统的 FFR 方案。图 1 所示为改进后的 FFR 方案。

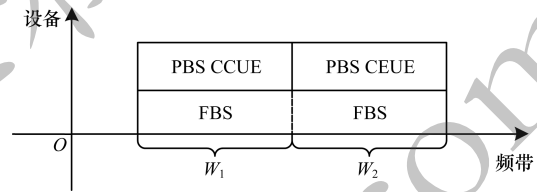


图 1 改进的 FFR、CCUE 与 CEUE 频谱分配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of improved FFR, CCUE and CEUE spectrum allocation

本文计算了目标 UE 被归类为 CEUE 和 CCUE 的概率。首先考虑 CEUE, 设 r_{op}^e 和 r_{op}^d 分别为目标 UE 与其服务 PBS 和主要干扰 PBS 之间距离的瑞利分布。根据所使用的 UE 簇分类, 得出关于 Φ_{TCP}^P 中目标 UE 位于簇边缘区域的概率为:

$$C_E = \mathbb{P}\{r_{op}^e \geq \xi r_{op}^d\} \stackrel{(a)}{=} \int_{r_e=0}^{\infty} \int_{r_d=r_e}^{r_e/\xi} f_{r_{op}^e, r_{op}^d}(r_d, r_e | \|x_0\|) dr_d dr_e \quad (4)$$

其中, (a) 服从以下条件, 即主要干扰 PBS 始终位于以 CCUE 为中心, 半径为 r_e 和 r_e/ξ 形成的圆环内, $r_e \leq r_d \leq r_e/\xi$ 。因此, $f_{r_{op}^e, r_{op}^d}(r_e, r_d | \|x_0\|)$ 是处于条件 $\|x_0\|$ 下 r_{op}^e 和 r_{op}^d 联合概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 的瑞利分布。考虑到最近距离 r_{op}^e 和 r_{op}^d , 在顺序统计下^[17-18], $f_{r_{op}^e, r_{op}^d}(r_e, r_d | \|x_0\|)$ 的 PDF 计算为:

$$f_{r_{op}^e, r_{op}^d}(r_e, r_d | \|x_0\|) \stackrel{(b)}{=} \frac{M_p!}{(M_p - 2)!} \times f_{w_{p_0}}(r_e) f_{w_{p_i}}(r_d) (1 - F_{w_{p_i}}(r_d))^{M_p - 2} \quad (5)$$

其中, $f_{w_H}(w) = \text{PDF} - R_a(w, 2\sigma^2)$ 表示 r_{op}^e 和 r_{op}^d 条件下的 PDF^[19], $F_{w_H}(w) = 1 - \exp\left(-\frac{w^2}{4\sigma^2}\right) (H \in \{P_0, P_i\})$ 表示 r_{op}^e 和 r_{op}^d 条件下的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF), (b) 服从簇内距离不相关的假设^[19]。联合 PDF $f_{r_{op}^e, r_{op}^d}(r_e, r_d | \|x_0\|)$ 可以进一步

计算为:

$$f_{r_{\text{op}}^c, r_{\text{op}}^d}(r_e, r_d | \|x_0\|) = \frac{M_p!}{(M_p-2)!} \times \frac{r_e}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_e^2}{4\sigma^2}\right) \times \frac{r_d}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_d^2}{4\sigma^2}\right) \times \exp\left(\frac{(M_p-2)}{4\sigma^2} r_d^2\right) \quad (6)$$

然后,将式(6)代入式(4),得出把目标 UE 分类为 CEUE 的概率:

$$C_E = M_p \left[\frac{1}{M_p} - \frac{1}{(M_p-1)/\xi^2 + 1} \right] = \frac{(M_p-1)(1-\xi^2)}{M_p-1+\xi^2} \quad (7)$$

同样,分别将 CCUE 与其服务的 PBS 和主要干扰 PBS 之间的距离表示为 r_{op}^c 和 r_{op}^d ,可以得出位于簇中心目标 UE 概率为:

$$C_C = \mathbb{P}\left\{\frac{r_{\text{op}}^c}{r_{\text{op}}^d} < \xi\right\} = 1 - \mathbb{P}\left\{\frac{r_{\text{op}}^c}{r_{\text{op}}^d} \geq \xi\right\} = \frac{M_p \xi^2}{M_p-1+\xi^2} \quad (8)$$

2 UE 级联准则与概率

假设开放访问方案允许用户连接到任何层 BS^[20-21]。受毫米波信号传播特性的启发,本文提出加权最近距离级联准则。设 r_{op} 和 r_{of} 分别为目标 UE 与 PBS 和 FBS 的最近距离。因此,目标 UE 与 PBS 级联的概率计算为:

$$A^P = \mathbb{P}\{P_F G_F^{\text{Max}} \beta_F r_{\text{of}}^{-1} < P_P G_P^{\text{Max}} \beta_P r_{\text{op}}^{-1}\} = \mathbb{P}\{r_{\text{op}} \alpha_{FP} < r_{\text{of}}\} \quad (9)$$

其中, $G_P^{\text{Max}} = M_P M_r$, $G_F^{\text{Max}} = M_F M_r$, β_P 和 β_F 分别是 P 和 F 层的级联偏差值,正偏差值意味着扩展覆盖范围, α_{FP} 定义如下:

$$\alpha_{FP} = \frac{P_F G_F^{\text{Max}} \beta_F}{P_P G_P^{\text{Max}} \beta_P} \quad (10)$$

根据式(9),目标 UE 与 FBS 级联的概率为 $A^F = 1 - A^P$ 。式(9)表明,为了实现级联概率 A^P ,需要对最近距离 r_{op} 和 r_{of} 进行统计描述。

2.1 CEUE 级联概率

对于簇过程 Φ_{TCP}^P ,当目标 UE 位于簇边缘区域时,本文将式(9)中最近距离 r_{op} 和 r_{of} 分别记为 r_{op}^e 和 r_{of}^e 。根据式(9),得出 CEUE 与 PBS 级联的概率为:

$$A_E^P = \mathbb{P}\{r_{\text{op}}^e \alpha_{FP} < r_{\text{of}}^e\} = \int_0^\infty \tilde{F}_{r_{\text{of}}^e}(\alpha_{FP} r) f_{r_{\text{op}}^e}(r) dr \quad (11)$$

其中, $\tilde{F}_{r_{\text{of}}^e}(\cdot)$ 表示最近距离 r_{of}^e 的互补 CDF,计算公式为:

$$\tilde{F}_{r_{\text{of}}^e}(r) = \exp\left(-\frac{M_F}{4\sigma^2} r^2\right) \quad (12)$$

其中, $f_{r_{\text{op}}^e}$ 表示最近距离 r_{op}^e 的 PDF,计算公式为:

$$f_{r_{\text{op}}^e}(r) = \frac{M_P}{C_E} \left\{ \frac{r}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{M_P}{4\sigma^2} r^2\right) - \frac{r}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{4\sigma^2}\right) \left(\frac{M_P-1}{\xi^2} + 1\right) \right\} \quad (13)$$

其中, C_E 表示目标 UE 位于簇边缘区域的概率。然后,把式(12)和式(13)代入式(11),得到定理 1。

定理 1 对于簇过程 Φ_{TCP}^P 中,CEUE 与代表簇中最近 PBS 级联的概率为:

$$A_E^P = \frac{M_P}{C_E} \left(1 / (M_M \alpha_{MP}^2 + M_P) - 1 / \left(M_M \alpha_{MP}^2 + \frac{M_P-1}{\xi^2} + 1 \right) \right) \quad (14)$$

因此,CEUE 与 FBS 的级联概率 A_E^F 为 $A_E^F = 1 - A_E^P$ 。

2.2 CCUE 级联概率

与 2.1 节类似,当目标 UE 位于代表簇过程 Φ_{TCP}^P 的中心区域时,本文将式(9)中最近距离分别记为 r_{op}^c 和 r_{of}^c 。考虑到 UE 簇分类仅基于 Φ_{TCP}^P ,很容易看出 r_{of}^c 和 r_{of}^e 的瑞利分布统计描述完全相同,即 $\tilde{F}_{r_{\text{of}}^c}(r) = \tilde{F}_{r_{\text{of}}^e}(r)$,其中互补 CDF $\tilde{F}_{r_{\text{of}}^c}(r)$ 由式(12)给出。PDF $f_{r_{\text{op}}^c}(r)$ 的计算公式如下:

$$f_{r_{\text{op}}^c}(r) = \frac{M_P}{C_C} \times \frac{r}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{4\sigma^2} \left(1 + \frac{M_P-1}{\xi^2}\right)\right) \quad (15)$$

其中,概率 $C_C = (M_P \xi^2) / (M_P - 1 + \xi^2)$ 由式(8)给出。然后使用类似于式(11)的定义,得到定理 2。

定理 2 相对于 Φ_{TCP}^P 中位于簇中心区域的 UE,即 CCUE 连接到 PBS 的级联概率为:

$$A_C^P = 1 / (M_F \alpha_{FP}^2 + 1 + (M_P - 1) / \xi^2) \times \frac{M_P}{C_C} \quad (16)$$

因此,CCUE 与 FBS 相级联的概率为 $A_C^F = 1 - A_C^P$ 。

3 DL 频谱效率分析

本节首先给出了目标 UE 接收到的 SINR。结合干扰的拉普拉斯变换和上述的级联概率,推导出相应的 DL 频谱效率。基于上述描述,给出目标 UE 的 SINR 为:

$$\text{SINR}_{\text{CYUE}}^B(r_{\text{ob}}^y | \|x_0\|) = \frac{P_B M_{Bt} M_r L(r_{\text{ob}}^y)}{\sigma_U^2 + I_{\text{CYUE}}^B}, r_{\text{ob}}^y \alpha_{TB} < r_{\text{ot}}^y \quad (17)$$

其中, $T(t)$ 和 $B(b) \in \{P(p), F(f)\}$, $Y(y) \in \{C(c), E(e)\}$, σ_U^2 是 UE 处的加性高斯噪声功率, $\text{SINR}_{\text{CYUE}}^B(r_{\text{ob}}^y | \|x_0\|)$ 表示 CYUE 与 B 层最近距离为 r_{ob}^y 的 BS 级联时,接收到的条件 SINR, P_B 是 B 层 BS 的传输功率, I_{CYUE}^B 是 CYUE 接收到的总干扰。根据本文所考虑的系统模型, SINR 将有 4 种形式,即 $\text{SINR}_{\text{CCUE}}^P$ 、 $\text{SINR}_{\text{CCUE}}^F$ 、 $\text{SINR}_{\text{CEUE}}^P$ 和 $\text{SINR}_{\text{CEUE}}^F$ 。

假设位于原点 O 的目标 UE 与 $\mathbb{S}_H^{x_0}$ 中位于 y_{d_0} 的 B 层 BS 相级联,则其干扰可以分为两类,即簇内干扰 $I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Intra}}$ 和簇间干扰 $I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Inter}}$ 。总的干扰 I_{CYUE}^B 计

算为:

$$I_{\text{CYUE}}^B = I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Intra}} + I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Inter}} \quad (18)$$

其中, $I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Intra}} = \sum_{y_d \in \mathbb{S}_H^0 \setminus y_{d0}} P_T G_T^t G_U^t L(\|x_0 + y_d\|)$ 表示

为当 CYUE 与 B 层 BS 相级联时, 来自簇内 PBS 和 FBS 的干扰, 其中 G_T^t 和 G_U^t 分别表示 BS 处的传输天线增益和 UE 处的接收天线增益, $I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Inter}} = \sum_{x \in \Phi_C \setminus x_{0y}} \sum_{y \in \mathbb{S}_H^t} P_T G_T^t G_U^t L(\|x + y\|)$ 表示来自簇间 PBS 和

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^y) = \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{p_i} \exp\left(-(\bar{c}_p - 1)(z P_p a_{p_i}) \times \left(C_L \int_{\min(\mu, r_{\text{op}}^y/\xi)}^{\mu} w^{-\alpha_L} f_{w_{p_i}}(w) dw + C_N \int_{\max(\mu, r_{\text{op}}^y/\xi)}^{\infty} w^{-\alpha_N} f_{w_{p_i}}(w) dw\right)\right) \quad (20)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{BT-Inter}}}(z) = \exp\left(-2\pi\lambda_C \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{p_i} (z \bar{c}_p P_p a_{p_i}) \times \left(C_L \int_0^{\mu} u u^{-\alpha_L} du + C_N \int_{\mu}^{\infty} u u^{-\alpha_N} du\right)\right) \quad (21)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^y, \eta) = \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{f_i} \exp\left(-(1-\eta)\bar{c}_F (z P_F a_{f_i}) \times \left(C_L \int_{\min(r_f^*, \mu)}^{\mu} w^{-\alpha_L} f_{w_{f_i}}(w) dw + C_N \int_{\max(r_f^*, \mu)}^{\infty} w^{-\alpha_N} f_{w_{f_i}}(w) dw\right)\right) \quad (22)$$

其中, $r_f^* = \alpha_{FP} r_{\text{op}}^c$ 是通过使用 UE 级联标准来实现。

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, \eta) = \exp\left(-2\pi\lambda_C \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{f_i} \left((1-\eta)\bar{c}_F P_F z a_{f_i}\right) \times \left(C_L \int_0^{\mu} u u^{-\alpha_L} du + C_N \int_{\mu}^{\infty} u u^{-\alpha_N} du\right)\right) \quad (23)$$

当 CYUE 与具有访问距离 r_{of}^y 的 FBS 相级联时, 接收到的干扰的拉普拉斯变换为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^F}(z, r_{\text{of}}^c, \eta) = \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Intra}}}(z, r_{\text{of}}^c) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Intra}}}(z, r_{\text{of}}^c, \eta) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, \eta) \quad (24)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Intra}}}(z, r_{\text{of}}^y)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, r_{\text{of}}^y, \eta)$ 分别为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Intra}}}(z, r_{\text{of}}^y) = \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{p_i} \exp\left(-\bar{c}_p (z P_p a_{p_i}) \times \left(C_L \int_{\min(\mu, r_{\text{of}}^y)}^{\mu} w^{-\alpha_L} f_{w_{p_i}}(w) dw + C_N \int_{\max(\mu, r_{\text{of}}^y)}^{\infty} w^{-\alpha_N} f_{w_{p_i}}(w) dw\right)\right) \quad (25)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, r_{\text{of}}^y, \eta) = \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{f_i} \exp\left(-(1-\eta)(z(\bar{c}_F - 1)P_F a_{f_i}) \times \left(C_L \int_{\min(r_{\text{of}}^y/\xi, \mu)}^{\mu} w^{-\alpha_L} f_{w_{f_i}}(w) dw + C_N \int_{\max(r_{\text{of}}^y/\xi, \mu)}^{\infty} w^{-\alpha_N} f_{w_{f_i}}(w) dw\right)\right) \quad (26)$$

联合考虑 UE 级联准则和 FBS 分别与 CCUE、CEUE 共享频带这一事实, 本文有 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z) = \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z)$, 且 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, \eta) = \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{FF-Inter}}}(z, \eta)$ 。使用式(17)很容易建立可实现的 DL 频谱效率的一般形式, 如式(27)所示:

$$\begin{aligned} S_{\text{CYUE}}^B &= \mathbb{E}\{\text{lb}(1 + \text{SINR}_{\text{CYUE}}^B(r_{\text{ob}}^y | \|x_0\|))\} = \\ &\mathbb{E}\{\text{lb}(1 + \text{SINR}_{\text{CYUE}}^B(r_{\text{ob}}^y | \|x_0\|))\} \times \mathbb{E}\{r_{\text{ob}}^y \alpha_{TB} < r_{\text{of}}^y\} = \\ &\mathbb{E}\left\{\text{lb}\left(1 + \frac{P_B M_{Bt} M_r L(r_{\text{ob}}^y)}{\sigma_u^2 + I_{\text{CYUE}}^B}\right)\right\} \times \mathbb{E}\{r_{\text{ob}}^y \alpha_{TB} < r_{\text{of}}^y\} \quad (27) \end{aligned}$$

其中, (a) 服从所使用的 UE 级联标准, (b) 服从独立

FBS 的干扰, $L(\cdot)$ 由式(3)给出。

因此, 当 CYUE 通过接入距离 r_{op}^y 与 PBS 级联时, 干扰 I_{CYUE}^P 的拉普拉斯变换计算为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^P}(z, r_{\text{op}}^c, \eta) = \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Inter}}}(z) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PF-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c, \eta) \times \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PF-Inter}}}(z, \eta) \quad (19)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c)$ 、 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Inter}}}(z)$ 、 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PF-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c, \eta)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PF-Inter}}}(z, \eta)$ 的拉普拉斯变换分别为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c, \eta) = \exp\left(-2\pi\lambda_C \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{p_i} (z \bar{c}_p P_p a_{p_i}) \times \left(C_L \int_0^{\mu} u u^{-\alpha_L} du + C_N \int_{\mu}^{\infty} u u^{-\alpha_N} du\right)\right) \quad (20)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PP-Inter}}}(z) = \exp\left(-2\pi\lambda_C \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{p_i} (z \bar{c}_p P_p a_{p_i}) \times \left(C_L \int_0^{\mu} u u^{-\alpha_L} du + C_N \int_{\mu}^{\infty} u u^{-\alpha_N} du\right)\right) \quad (21)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^{\text{PF-Intra}}}(z, r_{\text{op}}^c, \eta) = \sum_{i \in \{1,2,3,4\}} b_{f_i} \exp\left(-(1-\eta)\bar{c}_F (z P_F a_{f_i}) \times \left(C_L \int_{\min(r_f^*, \mu)}^{\mu} w^{-\alpha_L} f_{w_{f_i}}(w) dw + C_N \int_{\max(r_f^*, \mu)}^{\infty} w^{-\alpha_N} f_{w_{f_i}}(w) dw\right)\right) \quad (22)$$

性。因此, DL 频谱效率 S_{CYUE}^B 可以进一步计算为:

$$\begin{aligned} S_{\text{CYUE}}^B &= \int_0^{\infty} \frac{\exp(-z \sigma_u^2)}{z \ln 2} \times \\ &\left(\int_0^{\infty} (1 - \exp(-z P_B M_{Bt} M_r L(r))) \right. \\ &\left. \mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^B}(z, r, \eta) \tilde{F}_{r_{\text{of}}^y}(\bar{r} \alpha_{TB}) f_{r_{\text{ob}}^y}(r) dr \right) dz \quad (28) \end{aligned}$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{\text{CYUE}}^B}(z, r, \eta)$ 是干扰 I_{CYUE}^B 的拉普拉斯变换, $\tilde{F}_{r_{\text{of}}^y}(\cdot)$ 是 r_{of}^y 的互补 CDF, $f_{r_{\text{ob}}^y}(\cdot)$ 是 r_{ob}^y 的 PDF。

4 • 仿真结果与分析

通过上述推导和分析, 给出仿真和数值结果, 验证了推导的正确性, 并分析了不同网络参数对可实现的级联概率和频谱效率的影响。本文所有的仿真分析均使用表 2 所示的参数值。

表 2 仿真系统参数值

Table 2 Simulation system parameter values			
参数	取值	参数	取值
S/km^2	50×50	M_p	$\{4, 20\}$
λ_C/km^2	100	P_p/dBm	45
μ/m	100	\bar{c}_p	1 ~ 20
B/GHz	1	\bar{c}_F	$\{1, 5, 10\}$
$\beta_p = \beta_F$	1	ξ	$\{0.2, 0.8\}$

基于上述参数配置, 图 2 分析了不同网络参数对目标 UE 级联概率的影响。图 2(a) 分析了级联概率与发射功率 P_p 之间的关系。对于每个将目标 UE 分类为 CEUE 或 CCUE 的场景, 目标 UE 与 FBS 相级联的概率 A_C^F 和 A_E^F 都随着 P_p 的减小而减小, 然而与 PBS 级联的概率 A_C^P 和 A_E^P 随着 P_p 的增大而增大, 级联概率满足常数 $A_X^P + A_X^F = 1, X \in \{E, C\}$, 这与本文的系统模型是一致的。对于簇中 PBS 最大数目 M_p 的影响, 结果表明, 随着 M_p 数量的增加使 A_C^F 和

A_E^F 的值减少,而使 A_C^P 和 A_E^P 的值增加。这是因为在本文的方案中,只考虑 PBS 来实现 UE 簇分类。因此, M_p 增加会使目标 UE 与最近的 PBS 之间的距离减小,从而使级联概率 A_C^P 和 A_E^P 增加。除此之外,在 M_p 对 A_C^P 和 A_C^F 的影响较大的同时,对 A_E^P 和 A_E^F 的影响可忽略不计。因此, M_p 对 CCUE 的影响大于 CEUE。图 2(b) 分析了 UE 簇分类因子 ξ 对级联概率的影响。结果表明,CCUE 和 CEUE 与 PBS 的级联概率均随 ξ 增加,而 CCUE 与 FBS 级联的概率 A_C^F 随 ξ 增加,CEUE 与 FBS 的级联概率 A_E^F 随 ξ 增加而降低。

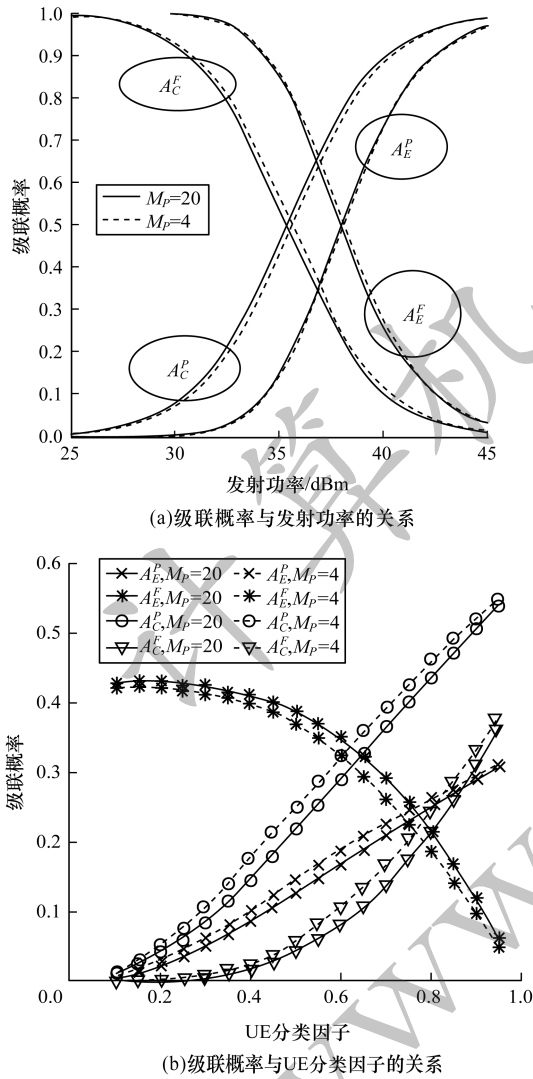


图 2 不同网络参数对级联概率的影响
Fig. 2 Influence of different network parameters on association probability

图 3 显示了 PBS、FBS 的 DL 频谱效率与活性因子 \bar{c}_p 之间的关系。容易看出, PBS 和 FBS 的 DL 频谱效率随着活性因子 \bar{c}_p 和 \bar{c}_f 的增加而降低,这是由于活动 PBS 和 FBS 干扰的增加所致。当联合考虑活性因子 \bar{c}_p 和 \bar{c}_f 时,发现当活性因子 \bar{c}_f 较小时,活性因子 \bar{c}_p 对 PBS、FBS 的 DL 频谱效率有较

大的影响。反之,当 \bar{c}_f 较大时, \bar{c}_p 的影响可以忽略不计。此外,从图 3(a) 可以看出,当目标 UE 与 PBS 级联时, CCUE 的 DL 频谱效率优于 CEUE。与图 3(a) 不同,图 3(b) 表明当目标 UE 与 FBS 级联时, CEUE 的 DL 频谱效率最优,而传统泊松点均匀分布方案的 DL 频谱效率最低。因此,在基于 PCP 的毫米波异构蜂窝网络中,采用基于最近距离比的 UE 簇分类方案可以优化系统性能。

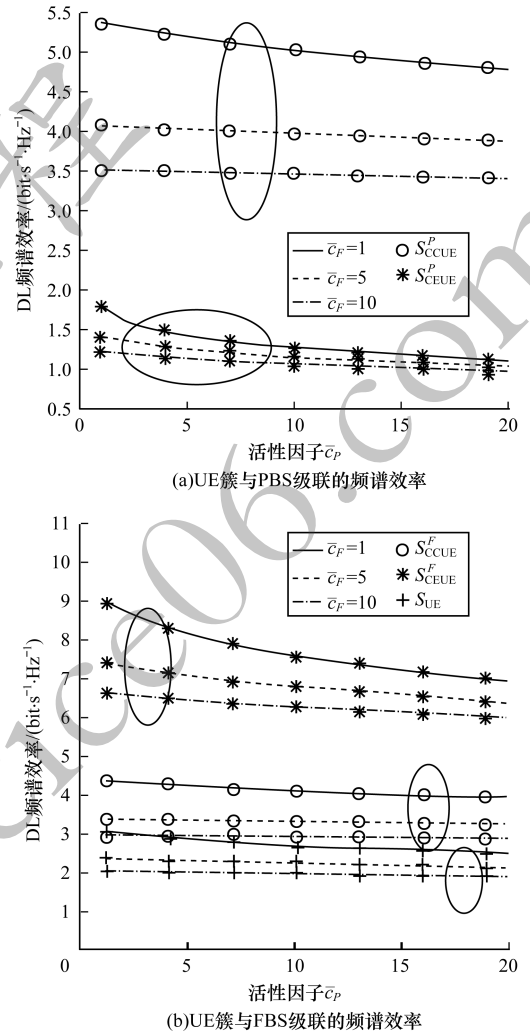


图 3 频谱效率与活性因子的关系
Fig. 3 Relationship of spectral efficiency and activity factor

5 结束语

本文基于 PCP 网络模型研究大规模热点区域毫米波异构网络模型的级联概率和频谱效率。在该网络模型下,借助毫米波路径损耗模型和随机几何方法,推导出 UE 级联概率和频谱效率表达式,并分析了相关参数对系统性能的影响。仿真结果表明,与传统基于 PPP 的网络模型相比,设置合适的 UE 簇分类因子可显著提高网络的级联概率和频谱效率。下一步将基于 PCP 网络模型研究毫米波异构网络的覆盖概率和能量效率。

参考文献

- [1] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] KHANDEKAR A, BHUSHAN N, JI T. LTE advanced: heterogeneous networks [EB/OL]. [2019-08-10]. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-heterogeneous-networks.pdf>.
- [3] MA Zhonggui, LIU Liyu, YAN Wenbo, et al. Deployment model of three-layer heterogeneous cellular networks based on poisson clustered process [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(2): 309-316. (in Chinese)
马忠贵, 刘立宇, 闫文博, 等. 基于泊松簇过程的三层异构蜂窝网络部署模型 [J]. 工程科学学报, 2017, 39(2): 309-316.
- [4] ELSAWY H, SULTAN-SALEM A, ALONINI M S, et al. Modeling and analysis of cellular networks using stochastic geometry: a tutorial [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 167-203.
- [5] DI RENZO M, ZAPPONE A, LAM T T, et al. System-level modeling and optimization of the energy efficiency in cellular networks—a stochastic geometry framework [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2539-2556.
- [6] JI Shanshan, JIA Xiangdong, XU Wenjuan, et al. Analysis for users-pair association schemes and security probability of relay-aided HetNets [J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(6): 697-706. (in Chinese)
纪珊珊, 贾向东, 徐文娟, 等. 中继协作异构网用户对级联方案及安全概率分析 [J]. 信号处理, 2018, 34(6): 697-706.
- [7] JIANG Yi, CHENG Zhe, ZOU Yang. Mobility vertical handoff algorithm based on multi-business [J]. Computer Engineering, 2017, 43(1): 168-171, 177. (in Chinese)
蒋溢, 成哲, 邹洋. 基于多业务的移动性垂直切换算法 [J]. 计算机工程, 2017, 43(1): 168-171, 177.
- [8] Mankar P D, DAS G, PATHAK S S. Modeling and coverage analysis of BS-centric clustered users in a random wireless network [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(2): 208-211.
- [9] TURGUT E, GURSOY M C. Downlink analysis in unmanned aerial vehicle assisted cellular networks with clustered users [J]. IEEE Access, 2018, 6: 36313-36324.
- [10] LI Zhongjie, LIU Qianqian, CHEN Yilei. Coverage probability analysis of three dimensional heterogeneous cellular networks based on user cluster distribution model [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(3): 375-381. (in Chinese)
李中捷, 刘倩倩, 陈焱雷. 基于用户簇分布模型的三维异构蜂窝网络覆盖概率分析 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2019, 31(3): 375-381.
- [11] MAHMUD A, HAMDI K A. A unified framework for the analysis of fractional frequency reuse techniques [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3692-3705.
- [12] XIE Bei, ZHANG Zekun, HU Qingyang, et al. Joint spectral efficiency and energy efficiency in FFR-based wireless heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8154-8168.
- [13] MANKAN P D, DAS G, PATHAK S S. Load-aware performance analysis of cell center/edge users in random HetNets [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2476-2490.
- [14] SKAUROUMOUNIS C, PSOMAS C, KRIKIDIS I. Low-complexity base station selection scheme in mmWave cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 4049-4064.
- [15] LI Zhongjie, CHEN Yilei, LIU Qianqian, et al. Performance study of hybrid spectrum access scheme in millimeter wave cellular network [J]. Journal on Communications, 2018, 39(8): 160-168. (in Chinese)
李中捷, 陈焱雷, 刘倩倩, 等. 毫米波蜂窝网络混合频谱接入方案的性能研究 [J]. 通信学报, 2018, 39(8): 160-168.
- [16] BAI T, HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 1100-1114.
- [17] DAVID H A, NAGARAJA H N. Order statistics [M]. New York, USA: John Wiley, 2003.
- [18] JIA Xiangdong, JI Shanshan, OUYANG Yuhua, et al. Non-best user association scheme and effect on multiple tiers heterogeneous networks [J]. IET Communications, 2018, 12(17): 2067-2075.
- [19] YI W, LIU Y, NALLANATAN A. Modeling and analysis of D2D millimeter-wave networks with poisson cluster processes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5574-5588.
- [20] JO H S, SANG Y J, XIA P, et al. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3484-3495.
- [21] SINGH S, ZHANG X, ANDREWS J G. Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5360-5373.

编辑 索书志