

用户簇分布的异构网络建模与覆盖分析

胡海霞¹ 贾向东^{1,2} 吕亚平¹ 曹胜男¹

(1. 西北师范大学计算机科学与工程学院, 甘肃兰州 730070;

2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003)

摘 要: 针对第五代/后五代(The Fifth Generation/Beyond The Fifth Generation, 5G/B5G)移动网络以用户为中心的小基站密集部署问题, 构建了一个用户簇分布的三层异构网络模型。该网络模型由宏基站(Macro Base Station, MBS)、微微基站(Pico Base Station, PBS)和毫微微基站(Femto Base Station, FBS)组成。采用随机几何理论对三层异构网络基站部署进行建模。充分分析了毫微微基站层基于 SSA 干扰管理的网络干扰统计特性, 考虑了有序 FBS 和无序 FBS 两种情况, 给出了 FBS 下行链路的覆盖概率。通过仿真, 验证了理论结果的正确性, 分析了覆盖半径、方差以及宏基站密度对覆盖概率的影响, 得出有序 FBS 方案和无序 FBS 方案在覆盖概率方面的好坏性取决于系统参数。

关键词: 用户簇分布; 异构网络; 覆盖概率; 随机几何

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.08.015

引用格式: 胡海霞, 贾向东, 吕亚平, 等. 用户簇分布的异构网络建模与覆盖分析[J]. 信号处理, 2020, 36(8): 1315-1325. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.08.015.

Reference format: Hu Haixia, Jia Xiangdong, LYU Yaping, et al. Modeling and Coverage Analysis of Heterogeneous Networks Based on User Cluster Distribution[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(8): 1315-1325. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.08.015.

Modeling and Coverage Analysis of Heterogeneous Networks Based on User Cluster Distribution

Hu Haixia¹ Jia Xiangdong^{1,2} LYU Yaping¹ Cao Shengnan¹

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Wireless Communication Key Lab of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: In order to solve the problem of dense deployment of user-centric small base stations in fifth generation/beyond the fifth generation (5G/B5G) networks, a three-tier heterogeneous network model with user cluster distribution was constructed. The network model consists of macro base stations (MBS), pico base stations (PBS) and femto base stations (FBS). Stochastic geometry theory is used to model the deployment of base stations in the three-tier heterogeneous network. Fully analyzed the network interference statistical characteristics of the femto base station tier based on SSA interference management, considered the two cases of ordered FBS and Non-ordered FBS, and gave the coverage probability of FBS downlink. Through simulation, the correctness of the theoretical results is verified, the influence of coverage radius, variance and macro base station density on coverage probability is analyzed, and it is concluded that the ordered FBS and the Non-ordered FBS scheme depend on the system parameters in terms of coverage probability.

Key words: user cluster distribution; heterogeneous networks; coverage probability; stochastic geometry

1 引言

随着物联网及移动互联网的蓬勃发展,5G/B5G无线通信网络面临着爆炸性的流量增长和成倍的设备接入问题。这使得传统异构网络技术的利用从简单的语音和数据转变为资源匮乏的多媒体信息娱乐应用。在这些高数据需求的驱动下,5G/B5G网络必须以更灵活的方式利用频谱资源^[1]。

为满足日益增长的高数据需求,现有的蜂窝网络向小区密集化和以用户为中心部署的小基站(Small Base Station, SBS)演进。在密集部署的小小区网络中,传统的宏基站被大规模部署的低功耗SBS所覆盖,这使得更多的用户设备(User Equipment, UE)可以被服务,并使UE更接近于基站(Base Station, BS)。SBS共同形成小小区,并与传统的高功率宏基站共存,从而产生了异构网络(Heterogeneous Networks, HetNets)^[2]。小小区的密集化部署在提高网络性能的同时也带来了严重的系统干扰管理问题^[3-4]。针对这一问题,文献[5-9]研究了部分频率复用(Fractional Frequency Reuse, FFR)技术。在FFR中,小区中心UE与小区边缘UE不共享任何频谱,可以减少小区中心和小区边缘UE的干扰。文献[10-12]研究了软频率复用(Soft Frequency Reuse, SFR)技术。与FFR不同,SFR则允许在每个小区中复用整个完整的频带。虽然,上述研究表明FFR和SFR优于传统网络。但是,在未来5G/B5G HetNets中,由于UE的随机性,网络在形状和大小上具有不规则性和随机性,导致难以实现符合FFR和SFR要求的子信道分配。为解决这一问题,文献[13]提出了一种共享频谱分配(Shared Spectrum Allocation, SSA)方法,该方法由无线电频谱的正交共享和共信道共享方案组成。文献[14]通过对比分析验证了SSA方法可以有效提高频谱效率和网络容量。受上述文献的启示,本文针对三层异构网络模型,提出了一种改进的SSA方法。

在多层5G/B5G HetNets中,由于BS部署的不规则性,随机几何空间成为异构网络精确建模和分析的主要工具。在这种方法中,大规模无线网络被抽象为方便的点过程。文献[5-12]利用随机几何模型对FFR和SFR蜂窝网络的性能进行了研究。文献[14]利用随机几何空间,导出了基于SSA的Het-

Nets覆盖性能。然而,这些工作都只是将每一层中BS和UE位置建模为独立的泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)。在基于5G/B5G HetNets的热点区域中,BS和UE之间的独立假设不是非常的准确,它们之间存在相关性。此时,则需要部署小小区来为UE簇提供服务。文献[15]利用泊松簇过程(Poisson Cluster Process, PCP),研究了用户分类的异构网络性能。利用了UE簇和BS之间的相关性。然而,在现实场景中,热点区域业务的密集化,导致数据速率在短时间内激增,造成簇中心BS过载。此时需要以簇中心部署模式为UE部署更多低功耗的FBS。这些簇中心FBS,可以为过载的中心BS提供流量分流。实际上,对于高密度HetNets,一个通用的模型是从热点中抽象出簇中心并建模为PPP。UE和所有SBS均匀分布在热点中心周围,并建模为PCP。然而,在基于SSA干扰管理的异构网络中这种建模是不可实现的。在SSA中,为进行干扰管理,将UE和FBS分为小区中心和小区边缘两类,导致小区中心和小区边缘用户的位置空间分离。对于活动节点的位置呈现空间分离的场景,单独的PCP和PPP模型不可实现。在这种情况下,更合适的模型是泊松洞过程(Poisson Hole Process, PHP)。如文献[16-18]所述,PHP是通过从PPP基线执行洞而形成的,其中洞的中心假定遵循独立的PPP。PPP边界线基线剩余点形成一个PHP。

综上所述,本文构建了一个由MBS、PBS和FBS组成的三层异构网络模型。利用PPP、PCP和PHP方法,将MBS和PBS位置建模为独立的PPP,将簇中心和簇边缘FBS和UE位置建模为PCP和PHP。为解决干扰问题,提出了改进的SSA方法,基于用户簇的分类为SSA的实现提供了可能性。在SSA中,总可用带宽被划分为两个正交子带,分别通过SSA中的正交共享分配给簇中心毫微微用户(Femto User Equipment, FUE)和簇边缘FUE。同时,为了提高频谱效率,采用共信道共享方法,两个子带分别由微微用户(Pico User Equipment, PUE)和宏用户(Macro User Equipment, MUE)共享。通过PHP和PCP方法,推导出了簇中心和簇边缘FBS的干扰统计特性,考虑了有序FBS和有序FBS两种情况,计算了FUE下行链路覆盖概率,对比分析了网络参数对覆盖概率的影响。

2 系统模型及假设

2.1 系统模型

如图 1 所示,基于用户簇分布的三层异构网络由宏小区层(M层, microcell tier),微微小区层(P层, picocell tier)和毫微微小区(F层, femtocell tier)层构成。其中,M层由 MBS 组成、P层由 PBS 组成, F层由 FBS 组成。每一层具有不同的发射功率、覆盖范围和空间密度。一般情况下,同一层中的 BS 具有相同的发射功率。 P_M 、 P_P 和 P_F 分别表示 MBS、PBS 和 FBS 的发射功率,且遵循功率约束 $P_M > P_P > P_F$ 。MBS 和 PBS 密集部署在 MBS 的覆盖范围之内,减轻 MBS 负载。MBS 配备有 N_M 个大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)发射天线,可与 S_M 个用户同时通信。PBS 配备有 N_P 个传统的 MIMO 发射天线,可与 S_P 个用户同时通信。而 FBS 和 UE 均配备单天线,每层的每一个 BS 至少级联一个 UE。MBS 和 PBS 的位置建模为独立 PPP Φ_M 和 Φ_P ,密度分别是 λ_M 和 λ_P 。在 5G/B5G HetNets 中为解决热点区域盲点覆盖以及 MBS 负载过重问题,密集化部署 PBS 和 FBS 成为重要解决方法。由于 FBS 的密集部署,导致 PBS 的位置与 UE 和 FBS 之间存在相关性。因此,对于簇边缘位置的点采用 PHP 辅助建模更符合实际。将 PBS 和 UE 位置建模为托马斯簇过程(Thomas Cluster Process, TCP) Θ_F 和 Θ_U ,密度分别是 λ_F 和 λ_U 。 Θ_F 父点过程服从 Φ_P ,即点过程 Θ_F 是由分散在父点过程 Φ_P 周围的簇成员(FBS)按照方差为 σ_F^2 的对称正态分布形成的^[19-21]。每个簇中的平均点数为 \bar{c}_F 。为描述 UE 和 PBS 位置的相关性,UE 根据平均数为 \bar{c}_D 的 TCP 独立地散布在父点过程 Φ_P 周围。同时,为提高小区边缘 UE 的性能,采用 PHP 对簇边缘的点进行建模。给定父点过程 Φ_P 中 PBS 的覆盖半径为 R_2 ,在 PBS 的覆盖区域内的点 Θ_F 称为簇中心 FBS 被建模为 $\Xi_F^{R_2} \triangleq \bigcup_{y \in \Theta_F} U b(y, R_2)$ 。余下的 FBS 点称为簇边缘 FBS 建模为 PHP $\Psi_F^{R_2} = \{x \in \Theta_F : x \neq \Xi_F^{R_2}\} = \Theta_F \setminus \Xi_F^{R_2}$ 。在 PBS 的覆盖区域内的点 Θ_U 称为簇中心 UE 被建模为 $\Xi_U^{R_2} \triangleq \bigcup_{y \in \Theta_U} U b(y, R_2)$,剩余的 UE 点称为簇边缘 UE 建模为 PHP $\Psi_U^{R_2} = \{x \in \Theta_U : x \neq \Xi_U^{R_2}\} = \Theta_U \setminus \Xi_U^{R_2}$ 。

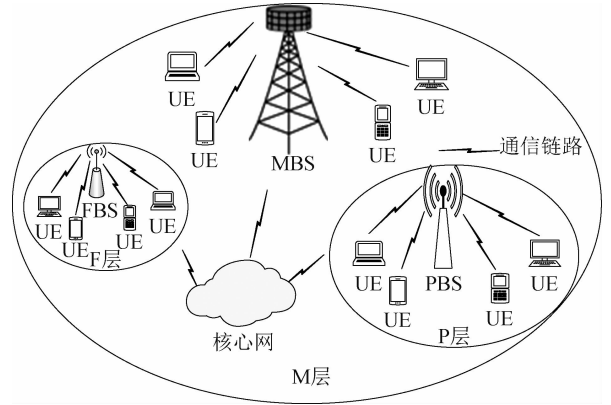


图 1 三层异构网络系统模型

Fig. 1 Three-tier heterogeneous network system model

假设忽略簇和洞的重叠影响,随机选择簇中任一用户为目标 UE,该簇称代表簇。服务于目标 UE 的 BS 称为标记基站。根据著名的 Slivnyak-Moche 定理,在 Borel 空间上,当且仅当 Palm 分布几乎与原分布定理一致时,点的过程是 PPP。因此,对以 $x_{P_0} \in \Phi_P$ 为代表簇中位于原点的目标 UE 进行分析。由于 MBS 的位置被建模为 Φ_M ,则目标 UE 到最近 MBS 的距离表示为 $\|x_M\|$, $\|x_M\|$ 的 PDF 由 $f_{\|x_M\|}(x) = 2\pi\lambda_M x \exp(-\pi\lambda_M x^2)$ 给出,其中 λ_M 表示 MBS 的密度。目标 UE 到簇中心 PBS 的距离表示为 $\|x_P\|$, $\|x_P\|$ 的 PDF 由 $f_{\|x_P\|}(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp(-\frac{x^2}{2\sigma^2})$ 给出,其中 σ^2 表示围绕簇中心的散射距离。

由于簇中 FBS 的数量是固定的,本文分别考虑了有序 FBS 和无序 FBS 两种情况。所谓有序 FBS 是指簇中 FBS 按照一定规律有序分布,此时,允许目标 UE 访问代表簇中最近的 FBS。而无序 FBS 是指簇中 FBS 的分布是随机的,同时允许目标 UE 在代表簇中随机选择 FBS。将目标 UE 到代表簇中 FBS 的距离记为 $\|x_F\|$ 。有序 FBS 情况下,距离 $\|x_F^O\|$ 由离目标 UE 最近的 FBS 的距离来表示, $\|x_F^O\| \in \Theta_F$ 。

$\|x_F^O\|$ 由 PDF $f_{\|x_F^O\|}(x) = \bar{c}_F \left(1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)}\right) \right)^{\bar{c}_F - 1} \frac{x}{(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)} \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)}\right)$ 给出。此方法下产生的路径损耗相对较小。无序 FBS 情况下,允许目标 UE 在簇中随机选择访问 FBS,则目标 UE 到 FBS 的

距离表示为 $\|\mathbf{x}_F^N\|$, $\|\mathbf{x}_F^N\| \in \Theta_F$. $\|\mathbf{x}_F^N\|$ 由 PDF $f_{\|\mathbf{x}_F^N\|}$

(x) = $1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)}\right)$ 给出。此时每个 UE 接

入 FBS 的机会均等, 网络不需要额外的瞬时信道状态信息。为方便描述, 后续 $\|\mathbf{x}_F^N\|$ 和 $\|\mathbf{x}_F^O\|$ 的上标索引统一删除, 用 $\|\mathbf{x}_F\|$ 表示 UE 到 FBSs 的距离。

2.2 共享频谱接入

为限制严重的干扰, 本文采用了 SSA 干扰管理策略, 频谱分配如图 2 所示。根据带宽分配因子 ξ 将可用总带宽 W 划分为两个正交子带 W_1 和 W_2 , 即 $W_1 = \xi W$, $W_2 = (1 - \xi)W$ 。假设子带 W_1 分配给为簇中心 UE 提供服务的 PBS, 子带 W_2 分配给为簇边缘 UE 提供服务的 MBS。由于采用了正交频谱共享, 有效地抑制了 MBS 与 PBS 之间的干扰。除正交频谱共享外, 还使用了共信道频谱共享。簇中心 FBS 与 MBS 共享子带 W_2 , 簇边缘 FBS 与 PBS 共享子带 W_1 。显而易见, 由于 PBS(MBS) 和 FBS 之间的反向频谱分配, 所考虑的共信道共享方案能够有效抑制层间干扰以及簇内 FUEs 和 PUEs 之间的干扰。此外, 簇中心和簇边缘 FBS 采用正交频谱, 从而抑制了同层干扰。

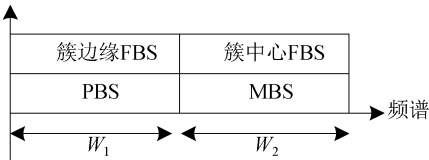


图2 频谱分配策略

Fig. 2 Spectrum allocation scheme

3 FBS 网络干扰统计描述

根据上述三层异构网络模型, 给出目标 UE 干扰的拉普拉斯变换。现有研究大多基于两层网络模型给出 M 层和 P 层的干扰统计(如文献[13-15]), 很少去考虑三层模型下, 部署及性能接近于

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}}(s) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \int_0^{R_2+R_3} \left(1 - \exp\left(-\bar{c}_F \int_0^{R_3} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{r} \bar{e}^{-\bar{r}^2} d\bar{\theta} d\bar{r}}{1 + sP_F\beta(\bar{r}^2 + r^2 - 2r\bar{r}\cos\bar{\theta})^{-\alpha/2}}\right) r dr\right)\right) \quad (4)$$

$\mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}}(s)$ 为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}}(s) = \exp\left\{-2\pi\lambda_M \sum_{\nu=1}^{S_M} \binom{S_M}{\nu} \left(\frac{sP_M}{S_M}\right)^\nu \frac{1}{\alpha} \left[\frac{(D_F^M(\mathbf{x}_F^C))^\alpha(1+2/\alpha-\nu)}{\nu-2/\alpha} {}_2F_1\left(S_M, \nu-\frac{2}{\alpha}; 1+\nu-\frac{2}{\alpha}; -\frac{sP_M}{S_M} R_1^{-\alpha}\right)\right]\right\} \quad (5)$$

UE 的 F 层干扰特性。故此本节主要研究 F 层网络的干扰统计特性。考虑到信号的传播损耗, 仅分析实际在目标 UE 处有贡献的主导干扰。根据目标 UE 在簇中位置, 给出簇中心 FUE 和簇边缘 FUE 两类干扰统计描述。

3.1 簇中心 FUE 干扰统计描述

首先, 考虑目标 UE 与来自 Θ_F 的 FBS 级联的情况。 Θ_F 中的 FBS 在 PBS 的覆盖区域内的点建模为 $\Xi_F^{R_2} \triangleq U b(\mathbf{y}, R_2)$, 而其余点建模为 $\Psi_F^{R_2} = \{x \in \Theta_F : x \neq \Xi_F^{R_2}\} = \Theta_F \setminus \Xi_F^{R_2}$ 。从图 2 可以看出, 由于簇中心 FBS 和 MBS 共享子带 W_2 , 因此, FBS 级联的簇中心 UE Φ_{CFU} 到 \mathbf{x}_F^C 的目标簇中心 FUE 的干扰公式如下:

$$I_{\text{CFU}} = I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}} + I_{\text{CFU}}^{\text{MT}} \quad (1)$$

其中, $I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}$ 是目标簇中心 FUE 接收到的簇中心 FBS 的干扰, $I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}$ 是来自 MBS 的干扰。考虑到目标 UE 位于 PBS 的覆盖范围内, 假设 FBSs 的覆盖半径为 R_3 , 则可能的簇中心位于 $\mathbf{x}_p \in \Phi_p \cap \bar{B}(0, R_2 + R_3)$ 区域。因此, 目标簇中心 FUE 与其服务 FBS 之间的级联距离为 $X_F^C = \|\mathbf{x}_F^C\|$, 则目标簇中心 FUE 受到位于 $\mathbf{y}_c \in B^{x_p} \cap b(X_F^C, R_3)$ 内所有 FBS 的干扰。因此, 式(1)簇中心干扰 $I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}$ 写为:

$$I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}} = \sum_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p \cap b(0, R_2 + R_3)} \sum_{\mathbf{y}_c \in B^{x_p} \cap b(0, R_3)} \alpha_F^c P_F h_{\mathbf{y}_c} \beta \|\mathbf{x}_p + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha} \quad (2)$$

目标簇中心 FUE 接收到 MBS 的干扰 $I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}$ 为:

$$I_{\text{CFU}}^{\text{MT}} = \sum_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(\mathbf{x}_F), R_1))} \frac{P_M}{S_M} g_{\mathbf{x}_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha} \quad (3)$$

其中, $g_{\mathbf{x}_m}$ 是遵循伽马分布的小尺度衰落干扰信道功率增益。得命题 1, 其证明见附录 A。

命题 1 目标簇中心 FUE 受到总干扰 $I_{\text{CFU}} = I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}} + I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}$ 的拉氏变换写为 $\mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}}(s) = \mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}}(s) \mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}}(s)$, 式中 $\mathcal{L}_{I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}}(s)$ 计算为:

其中, $D_F^M(\mathbf{x}_F^C) = (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{1/\alpha} \|\mathbf{x}_F^C\|$, 级联距离由有序 FBS 情况下 $X_F^{CO} = \|\mathbf{x}_F^{CO}\|$ 和无序 FBS 情况下 $X_F^{CN} = \|\mathbf{x}_F^{CN}\|$ 给出。

3.2 簇边缘 FUE 干扰统计描述

当 FBS 位于簇外时, 簇边缘 FBS 与所有 PBS 共享子带 W_1 。由于目标簇边缘 FUE 总是落在 PBS 的覆盖范围之外, 且只考虑主干扰, 则目标簇边缘 FUE 的干扰 I_{EFU} 写为:

$$\mathcal{L}_{I_{\text{EFU}}}(s) = \exp(-2\pi\bar{c}_F\lambda_p A_{I_{\text{EFU}}}^{\text{EFT}}) \int_{R_2}^{\infty} \exp\left(2\bar{c}_F\lambda_p \int_{\nu_1-R_2}^{\nu_1+R_2} \arccos\left(\frac{r^2+\nu_1^2-R_2^2}{2\nu_1 r}\right) \frac{1}{1+(sP_f\beta)^{-1}r^2} r dr\right) \times \\ 2\pi\lambda_p\nu_1 \exp(-\pi\lambda_p(\nu_1^2-R_2^2)) d\nu_1 \quad (7)$$

$$A_{I_{\text{EFU}}}^{\text{EFT}} = \frac{1}{2} \left[(R_3^2) {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 - \frac{2}{\alpha} + 1; -(sP_f\beta)^{-1}R_3^\alpha\right) - (X_F^E)^2 {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 - \frac{2}{\alpha} + 1; -(sP_f\beta)^{-1}(X_F^E)^\alpha\right) \right] \quad (8)$$

其中 X_F^E 是目标簇边缘 FUE 到其服务 FBS 的级联距离, 由有序 FBS 下 $X_F^{EO} = \|\mathbf{x}_F^{EO}\|$ 和无序 FBS 下 $X_F^{EN} = \|\mathbf{x}_F^{EN}\|$ 给出。

4 SINR 覆盖性能

上文构建了基于用户簇分布的异构网络模型, 描述了 FBS 网络干扰统计特性, 本节将研究该模型下的 SINR 覆盖概率。考虑到 UE 可以和三种类型发射机(MBS、PBS 和 FBS)中的一种级联, 并且可能位于簇中心或簇边缘, 故将目标 UE 接收到的 SINR 建模为:

$$\text{SINR}_{U}^V(\|\mathbf{x}_U^V\|) = \frac{P_{U,r}(\|\mathbf{x}_U^V\|)}{I_{\{|V\}|U\}} + \sigma_0^2} \quad (9)$$

其中, σ_0^2 为热噪声功率, $U \in \{F, P, M\}$, $V \in \{C, E\}$, $P_{U,r}(\|\mathbf{x}_U^V\|)$ 表示目标 UE 从位于 \mathbf{x}_U^V 且级联距离为 $X_U^V = \|\mathbf{x}_U^V\|$ 的服务 BS 接收的瞬时信号功率, $I_{\{|V\}|U\}$ 为目标 $U \in \{F, P, M\}$ UE 受到的干扰。则 SINR 覆盖概率的一般形式为:

$$C_U^V(X_U^V) = \mathbb{P}\{\text{SINR}_{U}^V(\|\mathbf{x}_U^V\|) > \tau\} = \\ \mathbb{E}_{X_F^C} \left\{ \frac{P_U/S_U g_{\|\mathbf{x}_U\|} \beta \|\mathbf{x}_U\|^{-\alpha}}{I_{\{|V\}|U\}} + \sigma_0^2} > \tau \right\} = \\ \mathbb{E} \left\{ g_{\|\mathbf{x}_U\|} > (\sigma^2 + I_{\{|V\}|U\}) \left(\frac{\tau (X_F^C)^\alpha}{P_U \beta / S_U} \right) \right\} \quad (10)$$

其中, τ 表示 SINR 阈值由目标速率确定。本小节主要研究 UE 和 FBS 级联的 FUE 下行链路覆盖概率。

$$I_{\text{EFU}} = \sum_{\mathbf{y}_n \in \Phi_{\text{EFU}} \cap \bar{B}(X_F^E, R_3) \setminus \mathbf{x}_F^E} P_F h_{\mathbf{y}_n} \beta \|\mathbf{y}_n\|^{-\alpha} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{y}_n \in \Phi_{\text{EFU}} \cap \bar{B}(X_F^E, R_3) \setminus \mathbf{x}_F^E$ 表示落入半径为 X_F^E 和 R_3 环内的一组簇边缘 FBS 干扰, 而位于 X_F^E 的服务 FBS 除外。由于使用了 SSA, 目标簇边缘 UE 所经历的干扰被有效地抑制了。因此, 得到命题 2, 证明见附录 B。

命题 2 干扰 I_{EFU} 的拉氏变换为:

4.1 FBS 下行链路覆盖概率

当目标簇中心(或簇边缘) FUE 与位于 $\mathbf{x}_F^C(\mathbf{x}_F^E)$ 且级联距离为 $X_F^C = \|\mathbf{x}_F^C\|$ ($X_F^E = \|\mathbf{x}_F^E\|$) 的 FBS 级联时, 目标 FUE 接收到的下行链路 SINR 写为:

$$\text{SINR}_F^{C(E)}(\|\mathbf{x}_F^{C(E)}\|) = \frac{P_F h_{\mathbf{x}_F^{C(E)}} \beta \|\mathbf{x}_F^{C(E)}\|^{-\alpha}}{I_{C(E)FU} + \sigma_0^2} \quad (11)$$

在小尺度衰落信道增益为 $h_{\mathbf{x}_F^{C(E)}}: \exp(1)$ 的情况下, 级联距离 $\|\mathbf{x}_F^{C(E)}\|$ 表示为 $X_F^{C(E)} = \|\mathbf{x}_F^{C(E)}\|$, 干扰 $I_{C(E)FU}$ 表示为 $I_{C(E)FU} = I_{C(E)FU}^{\text{FT}} + I_{C(E)FU}^{\text{MT}}$ 即 FUE 来自 FBS 和 MBS 的干扰。 I_{EFU} 通过命题 2 得到。利用小尺度衰落信道增益 $h_{\mathbf{x}_F^{C(E)}}: \exp(1)$, 很容易得到定理 1 给出的条件 SINR 的覆盖概率 $C_F^{C(E)}$ 。

定理 1 当目标簇中心(簇边缘) UE 与 FBS 级联时, SINR 覆盖概率 $C_F^{C(E)}$ 写为:

$$C_F^{C(E)} = \int_0^\infty \mathcal{L}_{I_{C(E)FU}} \left(\frac{\tau(x)^\alpha}{P_F \beta} \right) \exp\left(-\frac{\tau(x)^\alpha}{P_F \beta} \sigma_0^2\right) f_{X_F^{C(E)}}(x) dx \quad (12)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{C(E)FU}}$ 分别由命题 1 和命题 2 给出。有序和无序 FBS 的级联距离 $X_F^{C(E)}$ 的 PDF 分别为:

$$f_{X_F^{CN}}(x) = \frac{1}{\Lambda_F^{CN}} \frac{x}{(1 - \exp(-R_2^2/2\sigma_D^2))(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)} \times \\ \exp\left[-\left(\pi\lambda_M (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{2/\alpha} + \frac{1}{2\sigma^2} (\hat{B}_{PF}\hat{P}_{PF}\hat{G}_{PF})^{2/\alpha} + \frac{1}{2(\sigma_F^2 + \sigma_D^2)}\right) x^2\right] -$$

$$\frac{1}{\Lambda_F^{CN}} \frac{x}{(1-\exp(-R_2^2/2\sigma_D^2))(\sigma_F^2+\sigma_D^2)} \exp\left(-\left(\pi\lambda_M (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{2/\alpha} + \frac{1}{2\sigma^2}R_2^2 + \frac{1}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right)x^2\right) \quad (13)$$

$$f_{X_F^{CO}}(x) = \frac{1}{\Lambda_F^{CO}} \frac{\bar{c}_F x}{(1-\exp(-R_2^2/2\sigma_D^2))(\sigma_F^2+\sigma_D^2)} \left(1-\exp\left(-\frac{x^2}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right)\right)^{\bar{q}_F-1} \times \exp\left(-x^2\left(\pi\lambda_M (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{2/\alpha} + \frac{1}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right)\right) \times \left(\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(\hat{B}_{PF}\hat{P}_{PF}\hat{G}_{PF})^{2/\alpha}x^2\right) - \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}R_2^2\right)\right) \quad (14)$$

$$f_{X_F^{EO}}(x) =$$

$$\frac{1}{\Lambda_F^{EO}} \frac{\bar{c}_F x}{(\sigma_F^2+\sigma_D^2)} \left(1-\exp\left(-\frac{a^2}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right)\right)^{\bar{q}_F-1} \times \exp\left(-\pi\lambda_M (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{2/\alpha}x^2 - \frac{x^2}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right) \quad (15)$$

$$f_{X_F^{EN}}(x) = \frac{1}{\Lambda_F^{EN}} \frac{x}{(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}$$

$$\exp\left(-\pi\lambda_M (\hat{B}_{MF}\hat{P}_{MF}\hat{G}_{MF})^{2/\alpha}x^2 - \frac{x^2}{2(\sigma_F^2+\sigma_D^2)}\right) \quad (16)$$

其中, $\Lambda_F^{C(E)N(O)}$ 表示最强平均偏置接收功率准则下 UE 和 FBS 级联的级联概率。

5 仿真与分析

本节对前面得到的覆盖概率进行了数值分析与仿真。若无特别说明,数值分析与仿真将用下述参数值。假设网络中路径损耗指数为 $\alpha=2$, MBS 和 PBS 的密度为 $\lambda_M = (1 \sim 10) \text{ MBSs}/(\pi \times \text{Km}^2)$ 和 $\lambda_P = 10\lambda_M$ 。 Θ_F 和 Θ_U 以方差 $\sigma_F^2 = 10 \sim 1000$ 和 $\sigma_D^2 = 10 \sim 1000$ 分布在父点周围。活动 FBS 和 UE 的平均数目为 $\bar{c}_D = 10$ 和 $\bar{c}_F = 4 \sim 6$ 。 FBS、PBS 和 MBS 的发射

功率分别为 $P_F = 30 \text{ dBm}$ 、 $P_P = 20 \sim 45 \text{ dBm}$ 、 $P_M = 20 \sim 46 \text{ dBm}$,覆盖半径分别为 $R_1 = 1000 \text{ m}$ 、 $R_2 = 70 \sim 800 \text{ m}$ 、 $R_3 = 50 \sim 150 \text{ m}$ 。 MBS 天线阵列数 $N_M = 80$, $S_M = 6$, PBS 天线阵列数 $N_P = 10$, $S_P = 2$ 。 SINR 阈值 $\tau = 1.5$ 。网络的总可用带宽 $B = 20 \text{ MHz}$,整个网络工作在低于 6 GHz 的频带上。

图3研究了 FUE 下行链路覆盖概率与 FBS 关键参数 σ_F^2 和 \bar{c}_F 的关系。该图表明,随着 FBS 参数 \bar{c}_F 的增大,簇边缘 FUE 的覆盖概率增大。这是由于平均 FBS 分布越多,其覆盖范围越大,则其覆盖概率自然也就变大了,与实际相符。同时,还给出了有序 FBS 和无序 FBS 两种情况下参数 σ_F^2 和 \bar{c}_F 对 FBS 覆盖概率的影响。从图中可以观察到 σ_F^2 对无序 FBS 的覆盖概率影响较小,对有序 FBS 的覆盖概率影响较大,而且有序 FBS 的性能增益随平均数 \bar{c}_F 的增大而增大。这是由于随着 σ_F^2 的增加,更多 FBS 远离其簇中心,使目标簇边缘 FUE 受到的干扰减小。

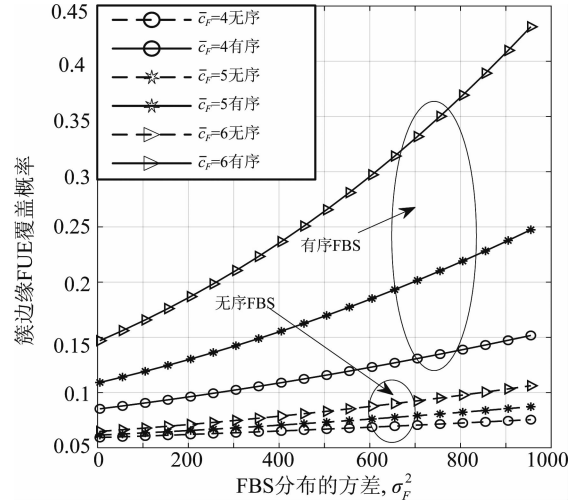


图3 FUE 覆盖概率与 σ_F^2 和 \bar{c}_F 的关系

Fig.3 Relationship between coverage probability of FUE and σ_F^2, \bar{c}_F

图4给出了 FUE 的覆盖概率与 MBS 密度 λ_M 之间的关系。由于 MBS 和簇中心 FBS 共享子带 W_2 , 目标簇中心 FUE 的覆盖概率随着 MBS 密度 λ_M 的增加而降低。同时,该图表明有序 FBS 方案可达性能增益与 BS 的半径有关。此外,在相同的系统参数下,有序 FBS 方案下簇中心和簇边缘 FUE 的覆盖概率小于无序 FBS 方案下的两类覆盖概率。而且,覆盖概率的差距随着密度 λ_M 的增大而增大。

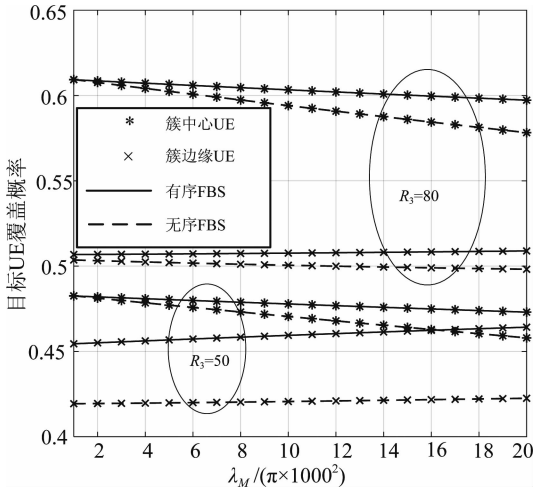
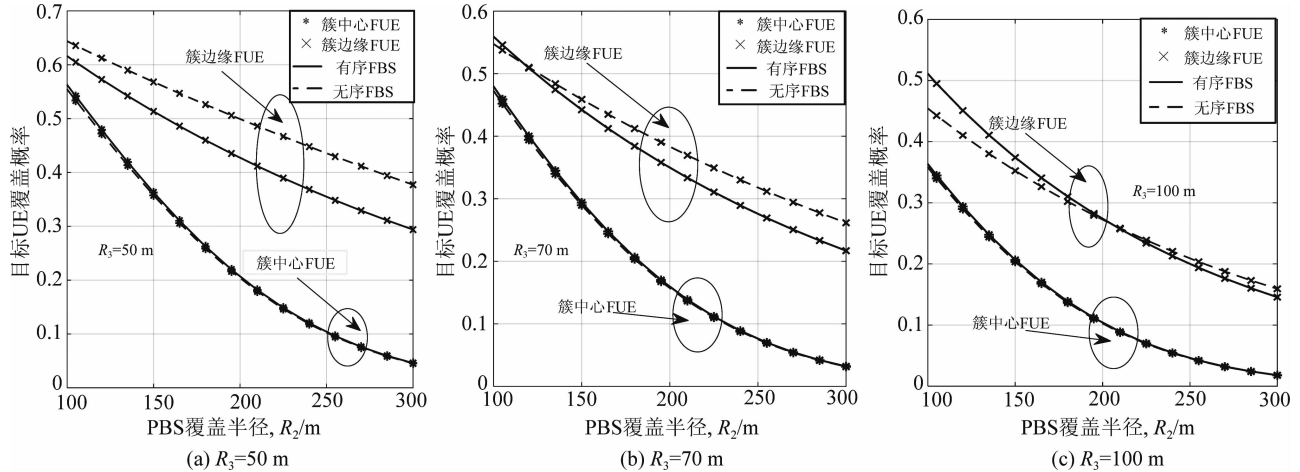
图 4 FUE 覆盖概率和 λ_M 的关系, $R_2 = 90$ mFig. 4 Relation between coverage probability of FUE and λ_M , $R_2 = 90$ m

图 5 进一步研究了覆盖概率与覆盖半径 R_2 和 R_3 之间的关系。通过观察可得,在有序 FBS 和无序

FBS 下,簇中心和簇边缘 FUE 的覆盖概率都随着 PBS 半径 R_2 的增大而减小。然而,在给定的簇中,活动 FBS 的数量 \bar{c}_F 恒定,目标簇中心 FUE 受到的干扰主要由 MBS 控制。因此,覆盖半径 R_2 和 R_3 对簇边缘 FUE 的影响较大,对簇中心 FUE 影响较小。比较图 5 中 (a)、(b)、(c) 可得,对于簇边缘 FUE,有序 FBS 方案是否优于无序 FBS 方案很大程度上由 R_2 和 R_3 共同决定。不难看出,只有在覆盖半径 R_3 较小的情况下,较大的覆盖范围内,有序 FBS 方案在簇边缘 FUE 的覆盖概率优于无序 FBS 方案。另外,当覆盖半径 R_2 很小时,有序 FBS 方案的性能并不优于无序 FBS 方案。只有当覆盖半径 R_2 较大时,有序 FBS 方案才具有优越性。这是因为 R_2 的增加表示簇边缘 FBS 的增加,使得簇边缘 FUE 的干扰减小。另一方面,随着半径 R_3 的增大,增加的 FBS 落入给定 FBS 的覆盖范围内。

图 5 覆盖半径 R_2 和 R_3 对 FUE 覆盖概率的影响Fig. 5 Impact of the coverage radii R_2 and R_3 on the coverage probabilities of FUE

6 结论

针对热点区域小基站密集部署问题,本文提出了一种基于用户簇分布的三层异构网络模型。为抑制层内和层间干扰,提出了 SSA 干扰管理方案。采用 PPP、PCP 和 PHP 对网络进行建模,给出毫微

微基站层网络干扰统计特性,分析了 FBS 下行链路的覆盖概率,并分析了参数对系统性能的影响。为进一步发掘其潜能,讨论了有序 FBS 和无序 FBS 两种情况。仿真结果表明,有序 FBS 方案在覆盖概率方面优于无序 FBS 方案。下一步将进一步研究网络整体的覆盖概率。

附录

附录 A: 命题 1 的证明

证明 首先计算干扰 $I_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}$ 的拉氏变换, 表示为:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}(s) &= \mathbb{E} \left\{ \exp(-sI_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}) \right\} = \mathbb{E} \left\{ \exp \left(-s \sum_{\mathbf{x}_P \in \Phi_P \cap b(0, R_2 + R_3)} \sum_{\mathbf{y}_c \in B^{\mathbf{x}_P} \cap b(X_F^c, R_3)} P_F h_{\mathbf{y}_c} \beta \|\mathbf{x}_P + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha} \right) \right\} \\ &\stackrel{(a)}{=} \mathbb{E} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_P \in \Phi_P \cap b(0, R_2 + R_3)} \prod_{\mathbf{y}_c \in B^{\mathbf{x}_P} \cap b(X_F^c, R_3)} \mathbb{E}_{h_{\mathbf{y}_c}} \left\{ \exp(-sP_F h_{\mathbf{y}_c} \beta \|\mathbf{x}_P + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha}) \right\} \right\} \\ &\stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{\Phi_P} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_P \in \Phi_P \cap b(0, R_2 + R_3)} \mathbb{E}_{B^{\mathbf{x}_P}} \left\{ \prod_{\mathbf{y}_c \in (B^{\mathbf{x}_P} \cap b(X_F^c, R_3))} \frac{1}{1 + sP_F \beta \|\mathbf{x}_P + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha}} \right\} \right\} \\ &\stackrel{(c)}{=} \mathbb{E}_{\Phi_P} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_P \in \Phi_P \cap b(0, R_2 + R_3)} \exp \left(-\bar{c}_F \int_{\mathbb{R}^2 \cap b(X_F^c, R_3)} \frac{f_{\mathbf{y}_c}(\mathbf{y}_c) d\mathbf{y}_c}{1 + sP_F \beta \|\mathbf{x}_P + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, (a) 由所有干扰的独立假设得到, (b) 为瑞利衰落假设 $h_{\mathbf{y}_c} \sim \exp(1)$, (c) 为通过将概率生成函数 (PGFL) 应用于 TCP 中密度为 $\bar{c}_F \int_{\mathbb{R}^2 \cap b(X_F^c, R_3)}$

$\frac{f_{\mathbf{y}_c}(\mathbf{y}_c) d\mathbf{y}_c}{1 + sP_F \beta \|\mathbf{x}_P + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha}}$ 的单个簇, 即 $\mathbb{E} \left\{ \prod_{\mathbf{x} \in \Phi} f(\mathbf{x}) \right\}$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}(s) &= \mathbb{E}_{\Phi_P} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_P \in \Phi_P \cap b(0, R_2 + R_3)} \exp \left(-\bar{c}_F \int_{X_F^c}^{R_3} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{r} e^{-\bar{r}^2} d\theta d\bar{r}}{1 + sP_F \beta (\bar{r}^2 + \|\mathbf{x}_P\|^2 - 2\|\mathbf{x}_P\| \bar{r} \cos \theta)^{-\alpha/2}} \right) \right\} \\ &\quad \exp \left\{ -2\pi\lambda_P \int_0^{R_2 + R_3} \left(1 - \exp \left(-\bar{c}_F \int_{X_F^c}^{R_3} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{r} e^{-\bar{r}^2} d\theta d\bar{r}}{1 + sP_F \beta (\bar{r}^2 + r^2 - 2r\bar{r} \cos \theta)^{-\alpha/2}} \right) \right) r dr \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

为计算干扰 $I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}$ 的拉氏变换。首先考虑, 当目标簇中心 UE 和 FBS 级联时, 根据所使用的 UE 级

联准则 $B_F P_F \beta \|\mathbf{x}_F\|^{-\alpha} > B_M G_M \frac{P_M}{S_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha}$, $\mathbf{x}_M \in \Phi_M \circ$

则干扰 MBS 的最短距离为 $D_F^M(X_F^c) = (\hat{B}_{MF} \hat{P}_{MF} \hat{G}_{MF})^{1/\alpha} X_F^c$ 。注意, 对于有序 FBS, 级联距离 $\|\mathbf{x}_F\|$ 由 $X_F^{\text{CO}} = \|\mathbf{x}_F^{\text{CO}}\|$ 给出, 对于无序 FBS, 级联距离 $\|\mathbf{x}_F\|$ 由 $X_F^{\text{CN}} = \|\mathbf{x}_F^{\text{CN}}\|$ 给出。因此, 目标 FUE 受到 MBS 的干扰为

$$\mathcal{L}_{\text{CFU}}^{\text{MT}}(s) = \mathbb{E} \left\{ \exp(-sI_{\text{CFU}}^{\text{MT}}) \right\} = \mathbb{E} \left\{ \exp \left(-s \sum_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(X_F^c), R_1))} \frac{P_M}{S_M} g_{\mathbf{x}_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha} \right) \right\}$$

$$\stackrel{(a)}{=} \mathbb{E}_{\Phi_M} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(X_F^c), R_1))} \mathbb{E}_{g_{\mathbf{x}_M}} \left\{ \exp \left(-s \frac{P_M}{S_M} g_{\mathbf{x}_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha} \right) \right\} \right\}$$

$$\stackrel{(b)}{=} \mathbb{E}_{\Phi_M} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(X_F^c), R_1))} \int_0^\infty \exp \left(-s\beta \frac{P_M}{S_M} \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha} t \right) \frac{t^{S_M-1}}{\Gamma(S_M)} e^{-t} dt \right\}$$

$$= \mathbb{E}_{\Phi_M} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(X_F^c), R_1))} \left(1 + s \frac{P_M}{S_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha} \right)^{-S_M} \right\} \stackrel{(c)}{=} \exp \left(-2\pi\lambda_M \int_{D_F^M(X_F^c)}^{R_1} \left(1 - \left(1 + \frac{s\beta P_M}{S_M} r^{-\alpha} \right)^{-S_M} \right) r dr \right) \quad (19)$$

$= \exp(-\lambda \int_{\mathbb{R}^2} (1-f(x)) dx)^{[22-23]}$ 。然后, 通过将子点 (FBSs) 的分布应用于极坐标, 子点在 TCP 和笛卡尔坐标系中围绕父点 (PBS) 分布, 则 $\mathcal{L}_{\text{CFU}}^{\text{CFT}}(s)$ 进一步计算为:

$I_{\text{CFU}}^{\text{MT}} = \sum_{\mathbf{x}_M \in (\Phi_M \cap \bar{B}(D_F^M(X_F^c), R_1))} \frac{P_M}{S_M} g_{\mathbf{x}_M} \beta \|\mathbf{x}_M\|^{-\alpha}$, 其中, $g_{\mathbf{x}_m}$ 是遵循伽马分布的小尺度衰落干扰信道功率增益。因为假设每个 MBS 配备有 N_M 天线, 并与 S_M UE 同时通信, 所以 $g_{\mathbf{x}_m}$ 的 PDF $f_{g_{\mathbf{x}_m}}(x) = \frac{1}{\Gamma(S_M)} x^{S_M-1} e^{-x}$ 给出^[12,24]。因此, 干扰 $I_{\text{CFU}}^{\text{MT}}$ 的拉氏变换计算为:

其中(a)服从 Φ_M 和 Θ_F 中点的独立假设, (b)通过使用文献[16]中的(3.351.3)获得, (c)通过应用 TCP 中单个

簇的概率生成函数 (PGFL) 获得, 即 $\mathbb{E}\left\{\prod_{x \in \Phi} f(x)\right\} = \exp\left(-\lambda \int_{\mathbb{R}^2} (1-f(x)) dx\right)$ 。为进一步推导出 $\mathcal{L}_{I_{CFU}^{MT}}(s)$

的简易形式, (19) 的积分重新写为:

$$\begin{aligned} & \int_{D_F^M(X_F^C)} \left(1 - \left(1 + \frac{s\beta P_M r^{-\alpha}}{S_M}\right)^{-S_M}\right) r dr = \\ & \int_0^{R_1} \left(1 - \left(1 + \frac{s\beta P_M r^{-\alpha}}{S_M}\right)^{-S_M}\right) r dr - \\ & \int_0^{D_F^M(X_F^C)} \left(1 - \left(1 + \frac{s\beta P_M r^{-\alpha}}{S_M}\right)^{-S_M}\right) r dr \quad (20) \end{aligned}$$

使用[25]中的(3.191.6), 式(20)的第一部分计算为

$$\begin{aligned} & \int_0^{R_1} \left(1 - \left(1 + \frac{s\beta P_M r^{-\alpha}}{S_M}\right)^{-S_M}\right) r dr = \\ & \frac{R_1^2}{2} - \frac{1}{\alpha} \int_{R_1^{-\alpha}}^{\infty} \frac{t^{-2/\alpha-1} dt}{(1 + s(P_M/S_M)t)^{S_M}} = \\ & \frac{R_1^2}{2} - \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_1^{2\alpha+S_M}}{(s(P_M/S_M))^{S_M}(S_M + 2/\alpha)} \right) \\ & {}_2F_1\left(S_M, S_M + \frac{2}{\alpha}; S_M + \frac{2}{\alpha} + 1; -\frac{1}{s(P_M/S_M)R_1^{-\alpha}}\right) \quad (21) \end{aligned}$$

因此, 结合(21)、(20)和(19), 得到 $\mathcal{L}_{I_{CFU}^{MT}}(s)$ 如式(5)。得证命题 1。

附录 B: 命题 2 证明

证明 簇边缘 FBS 受到的干扰 I_{EFU}^{EFT} 的拉氏变换为:

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}_{I_{EFU}^{EFT}}(s) = \\ & \mathbb{E}\left\{\exp\left(-s \sum_{y_n \in \Phi_{EF} \cap \bar{B}(X_F^E, R_3)} P_F h_{y_n} \beta \|y_n\|^{-\alpha}\right)\right\} = \\ & \mathbb{E}\left\{\exp\left(-s \sum_{y_n \in (\Theta_F \cap \bar{B}(X_F^E, R_3)) \cap E_{R_2}^C} P_F h_{y_n} \beta \|y_n\|^{-\alpha}\right)\right\} = \\ & \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \mathbb{E}_{\Theta_F} \left\{ \prod_{y_n \in (\Theta_F \cap \bar{B}(X_F^E, R_3)) \cap E_{R_2}^C} \frac{1}{1 + sP_F \beta \|y_n\|^{-\alpha}} \right\} \right\} = \\ & \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp\left(-\lambda_p \bar{c}_F \int_{\mathbb{R}^2 \cap \bar{B}(X_F^E, R_3)} \frac{dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}} + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \lambda_p \bar{c}_F \int_{E_{R_2}} \frac{dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}} \right\} = \\ & \exp\left(-2\pi\lambda_p \bar{c}_F \int_{X_F^E}^{R_3} \frac{r dr}{1 + (sP_F \beta)^{-1} r^{-\alpha}}\right) \\ & \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp\left(\lambda_p \bar{c}_F \int_{E_{R_2}} \frac{dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}}\right) \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

其中, \mathbf{x}_F^E 是从目标簇边缘 FUE 到其服务 FBS 的级联距离。对于有序 FBS, \mathbf{x}_F^E 由 $X_F^{CO} = \|\mathbf{x}_F^{CO}\|$ 给定。对于无序 FBS, \mathbf{x}_F^E 由 $X_F^{CN} = \|\mathbf{x}_F^{CN}\|$ 给定。在式(22)中, 使用文献[25]中的(3.191.6), 则第一部分写为

$$\begin{aligned} & A_{I_{EFU}^{EFT}} = \exp\left(-2\pi\lambda_p \bar{c}_F \int_{X_F^E}^{R_3} \frac{r dr}{1 + (sP_F \beta)^{-1} r^{-\alpha}}\right) = \\ & \exp\left(-2\pi\lambda_p \bar{c}_F \frac{1}{\alpha} \int_{(X_F^E)^\alpha}^{R_3^\alpha} \frac{t^{2/\alpha-1}}{1 + (sP_F \beta)^{-1} t} dt\right) = \\ & \exp\left(-2\pi\lambda_p \bar{c}_F \frac{1}{\alpha} \left[\int_0^{R_3^\alpha} \frac{t^{2/\alpha-1}}{1 + (SP_F \beta)^{-1} t} - \int_0^{(X_F^E)^\alpha} \frac{t^{2/\alpha-1}}{1 + (SP_F \beta)^{-1} t} \right] \right) = \exp\left(-2\pi\lambda_p \bar{c}_F \frac{1}{\alpha} \right. \\ & \left. \left[\frac{R_3^2}{2/\alpha} {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; \frac{2}{\alpha} + 1; - (sP_F \beta)^{-1} R_3^\alpha\right) - \frac{(X_F^E)^2}{2/\alpha} {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; \frac{2}{\alpha} + 1; - (sP_F \beta)^{-1} (X_F^E)^\alpha\right) \right] \right) \quad (23) \end{aligned}$$

受文献[16]、[17]的启发, 通过利用 $\int_{E_{R_2}}$

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_p \bar{c}_F dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}} = \sum_{x_p \in \Phi_p} \int_{b(x_p, R_2)} \frac{\lambda_p \bar{c}_F dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}} \\ & \text{忽略洞重叠的影响, 则(22)的第二部分为:} \\ & B_{I_{EFU}^{EFT}} = \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp\left(\lambda_p \bar{c}_F \int_{E_{R_2}} \frac{dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}}\right) \right\} = \\ & \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp\left(\sum_{x_p \in \Phi_p} \int_{b(x_p, R_2)} \frac{\lambda_p \bar{c}_F dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}}\right) \right\} = \\ & \mathbb{E}_{\Phi_p} \left\{ \prod_{x_p \in \Phi_p} \exp\left(\int_{b(x_p, R_2)} \frac{\lambda_p \bar{c}_F dy_n}{1 + (sP_F \beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}}\right) \right\} \quad (24) \end{aligned}$$

对于给定的洞过程 $b(\mathbf{x}_p, R_2)$, 有 $\|\mathbf{x}_p\| - R_2 \leq \|y_n\| \leq \|\mathbf{x}_p\| + R_2$ 。然后, 利用余弦定律 $r^2 + \nu_1^2 -$

$2\nu_1 r \cos(\theta(r)) = R_2^2$ 和 $r = \|\mathbf{y}_n\|$, 上述表达式进一步计算为:

$$B_{\text{EFU}}^{\text{EFT}} = \mathbf{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp \left(\lambda_p \bar{c}_F \int_{E_{R_2}} \frac{d\mathbf{y}_n}{1 + (sP_F\beta)^{-1} \|\mathbf{y}_n\|^2} \right) \right\} =$$

$$\mathbf{E}_{\Phi_p} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p} \exp \left(\int_{b(\mathbf{x}_p, R_2)} \frac{\lambda_p \bar{c}_F d\mathbf{y}_n}{1 + (sP_F\beta)^{-1} \|\mathbf{y}_n\|^2} \right) \right\} =$$

$$\mathbf{E}_{\Phi_p} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p} \exp \left(2\lambda_p \bar{c}_F \int_{\|\mathbf{x}_p\| - R_2}^{\|\mathbf{x}_p\| + R_2} \frac{1}{1 + (sP_F\beta)^{-1} r^2} r dr \right) \right\} =$$

$$\exp \left(-2\pi\lambda_p \int_{R_2}^{\infty} \left\{ 1 - \exp \left(-2\lambda_p \bar{c}_F \int_{\|\mathbf{x}_p\| - R_2}^{\|\mathbf{x}_p\| + R_2} \frac{1}{1 + (sP_F\beta)^{-1} r^2} r dr \right) \right\} \nu d\nu \right)$$

$$\arccos \left(\frac{r^2 + \nu^2 - R_2^2}{2\nu r} \right) \frac{1}{1 + (sP_F\beta)^{-1} r^2} r dr \right) \nu d\nu \quad (25)$$

同时,与距离较远的洞相比,靠近簇边缘的洞 FUE 影响要显著得多。因此,为了实现易于使用的推导,本文只考虑一个洞,即最靠近簇边缘的洞 FUE,而忽略其他洞。由于目标簇边缘 FUE 总是位于相关半径为 R_2 的洞外,其最接近 Φ_p 的点位于距其距离为 R_2 的位置。基于上述分析,通过假设最近点的距离为 $\nu_1 = \|\mathbf{x}_p\|$, 且 $\mathbf{x}_p \in \Phi_p$, 得出 ν_1 的 PDF 为:

$$f_{\nu_1}(\nu_1) = 2\pi\lambda_p\nu_1 \exp(-\pi\lambda_p(\nu_1^2 - R_2^2)), \nu_1 \geq R_2 \quad (26)$$

然后,对关于 $f_{\nu_1}(\nu_1)$ 分布的表达式(25)。进行解条件,得到:

$$B_{\text{EFU}}^{\text{EFT}} = \mathbf{E}_{\Phi_p} \left\{ \exp \left(\lambda_p \bar{c}_F \int_{E_{R_2}} \frac{d\mathbf{y}_n}{1 + (sP_F\beta)^{-1} \|\mathbf{y}_n\|^2} \right) \right\} =$$

$$\int_{R_2}^{\infty} \exp \left(2\lambda_p \bar{c}_F \int_{\nu_1 - R_2}^{\nu_1 + R_2} \arccos \left(\frac{r^2 + \nu_1^2 - R_2^2}{2\nu_1 r} \right) \frac{1}{1 + (sP_F\beta)^{-1} r^2} r dr \right) \times$$

$$2\pi\lambda_p\nu_1 \exp(-\pi\lambda_p(\nu_1^2 - R_2^2)) d\nu_1 \quad (27)$$

结合(27)、(22)和(23),得出:

$$\mathcal{L}_{\text{EFU}}^{\text{EFT}}(s) = A_{\text{EFU}}^{\text{EFT}} B_{\text{EFU}}^{\text{EFT}} \quad (28)$$

其中, $A_{\text{EFU}}^{\text{EFT}}$ 由(23)给出。注意,从(23)得到的是从目标簇边缘 FUE 到其服务 FBS 的访问距离 X_f 的拉

式变换 $\mathcal{L}_{\text{EFU}}^{\text{EFT}}(s)$ 。得证命题 2。

参考文献

- [1] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] Kamel M, Hamouda W, Youssef A. Ultra-dense networks: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522-2545.
- [3] 徐文娟, 贾向东, 杨小蓉, 等. 多层异构网络第 m 阶用户级联方案[J]. 信号处理, 2019, 35(2): 275-284. Xu Wenjuan, Jia Xiangdong, Yang Xiaorong, et al. A novel m-th best user association scheme for multi-tier heterogeneous networks[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(2): 275-284. (in Chinese)
- [4] 江玉函, 邹玉龙, 郑宝玉. 新一代超密集异构蜂窝无线网络研究[J]. 信号处理, 2020, 36(2): 159-167. Jiang Yuhuan, Zou Yulong, Zheng Baoyu. Research on New Generation of Ultra-Dense Heterogeneous Cellular Wireless Networks[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(2): 159-167. (in Chinese)
- [5] Chang S H, Park H G, Kim S H, et al. Study on Coverage of Full Frequency Reuse in FFR Systems Based on Outage Probability[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(11): 5828-5843.
- [6] García-Morales J, Femenias G, Riera-Palou F. On the design of OFDMA-based FFR-aided irregular cellular networks with shadowing[J]. IEEE Access, 2018, 6: 7641-7653.
- [7] Huawei. Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE [C] // 3GPP TSG RAN WG1 Meeting 41, Athens, Greece, May, 2005.
- [8] Li J, Shroff N, Chong E. A reduced-power channel reuse scheme for wireless packet cellular networks[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1999, 7(6): 818-832.
- [9] Doppler K, Wijting C, Valkealahti K. Interference aware scheduling for soft frequency reuse[C] // IEEE Vehicular Technology Conference, 2009: 1-5.
- [10] Peng M, Zhang K, Jiang J, et al. Energy-Efficient Resource Assignment and Power Allocation in Heterogeneous Cloud Radio Access Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(11): 5275-5287.
- [11] He A, Wang L, Chen Y, et al. Throughput and Energy Efficiency for S-FFR in Massive MIMO Enabled Heterogeneous C-RAN[C] // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016: 1-6.

- [12] Wang L, Wong K, El Kashlan M, et al. Secrecy and Energy Efficiency in Massive MIMO Aided Heterogeneous C-RAN; A New Look at Interference[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(8): 1375-1389.
- [13] Kim Y, Kwon T, Hong D. Area spectral efficiency of shared spectrum hierarchical cell structure networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4145-4151.
- [14] Mankar P D, Das G, Pathak S, et al. Load-aware performance analysis of cell center/edge users in random HetNets[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2476-2490.
- [15] 路艺, 贾向东, 吕亚平, 等. 用户设备分类的毫米波异构网络性能研究[J]. 信号处理, 2020, 36(3): 407-414.
Lu Yi, Jia Xiangdong, Lv Yaping, et al. Research on Performance of Millimeter-Wave Heterogeneous Networks Based on User Equipment Classification[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(3): 407-414. (in Chinese)
- [16] Kishk M A, Dhillon H S. Tight Lower Bounds on the Contact Distance Distribution in Poisson Hole Process[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(4): 454-457.
- [17] Afshang M, Dhillon H S. Spatial modeling of device-to-device networks; Poisson cluster process meets Poisson Hole Process[C]//Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2015: 317-321.
- [18] Yazdanshenasan Z, Dhillon H S, Afshang M, et al. Poisson Hole Process; Theory and Applications to Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7531-7546.
- [19] Chun Y J, Hasna M O, Ghayeb A, et al. Modeling heterogeneous cellular networks interference using poisson cluster processes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(10): 2182-2195.
- [20] Afshang M, Dhillon H S. Poisson cluster process based analysis of HetNets with correlated user and base station locations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2417-2431.
- [21] Tabassum H, Hossain E, Hossain J. Modeling and analysis of uplink non-orthogonal multiple access in large-scale cellular networks using poisson cluster processes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(8): 3555-3570.
- [22] Chiu S, Stoyan D, Kendall W, et al. Stochastic Geometry and its Applications[M]. Third Edition, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] Ganti R K, Haenggi M. Interference and Outage in Clustered Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 4067-4086.
- [24] He A, Wang L, El Kashlan M, et al. Spectrum and energy efficiency in massive MIMO enabled HetNets: A stochastic geometry approach[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2294-2297.
- [25] Gradshteyn I, Ryzhik I, Geronimus Yu, et al. Table of Integrals, Series, and Products[M]. Seventh Edition, San Diego, Academic Press, 2007.

作者简介



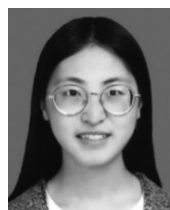
胡海霞 女, 1990年生, 甘肃宁县人。西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为无线通信系统信道估计、异构网络通信。
E-mail: 939855314@qq.com



贾向东 男, 1971年生, 甘肃渭源人。西北师范大学计算机科学与工程学院教授, 南京邮电大学博士、博士后, 主要研究方向为下一代无线网络、5G技术、协作通信、压缩感知协作、网络编码、物联网技术等。
E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn



吕亚平 女, 1994年生, 河南商丘人。西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生。研究方向为基于深度强化学习的5G异构网络研究、中继无线通信、D2D通信。
E-mail: 1059223738@qq.com



曹胜男 女, 1996年生, 甘肃定西人。西北师范大学计算机科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为无人机通信。
E-mail: 1625657505@qq.com