

基于簇用户设备分类和频谱共享分配的 D2D网络覆盖分析

吕亚平¹, 贾向东^{1,2}, 路 艺¹, 牛春雨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: D2D通信是5G/B5G网络的关键技术之一,同时小小区的中心化部署形成了以父点为中心的簇.因此,文章构建了一个基于泊松点和泊松簇过程的网络模型,提出了一种基于簇的用户设备(User Equipment, UE)分类方案,并设计了联合正交与共享的频谱资源分配方案.基于簇的UEs分类方案将UEs分为不同类型的簇中心和簇边缘UEs;联合频谱分配方案,将可获得的频带分为正交的两个子带,不同类型的UEs (BSs)共享子带.对此设计,建立了D2D接收机的干扰模型,给出了干扰分布,并分析了簇中心和簇边缘D2D接收机的覆盖概率.仿真和数值结果表明D2D网络覆盖概率随着微微BS (Pico BS, PBS)发射功率的减小而增加.同时,也给出了PBS覆盖半径和D2D发射机覆盖半径对D2D网络覆盖概率的影响.

关键词: 异构网; D2D通信; 用户设备分类; 频谱共享分配; 覆盖概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2021) 07-1392-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200460

D2D Network Coverage Analysis Based on Cluster User Equipment Classification and Spectrum Sharing Allocation

LÜ Ya-ping¹, JIA Xiang-dong^{1,2}, LU Yi¹, NIU Chun-yu¹, CAO Sheng-nan¹

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

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

Abstract: D2D communication is one of the key technologies of 5G/B5G networks. Meanwhile, in 5G/B5G network, the centralized deployment of small base stations (BSs) makes user equipment (UE) located inside or outside the cluster. This paper constructs a network model based on Poisson point and Poisson cluster processes, and proposes a cluster-based UEs classification scheme as well as a spectrum resource allocation scheme by joining orthogonal and sharing methods. The cluster-based UEs classification scheme divides UEs into different types of cluster center and cluster edge UEs. The joint spectrum allocation scheme divides the available frequency band into two orthogonal sub-bands, which are allocated to different types of UEs (BSs). For this design, this paper establishes a D2D receiver interference model, gives the interference distribution, and analyzes the coverage probability of the cluster center and cluster edge D2D receivers. Simulation and numerical results show that the D2D network coverage probability increases as the transmit power of pico BS (PBS) decreases. Meanwhile, the influence of the coverage radius of PBS and D2D transmitters on the coverage probability of the D2D network is also given.

Key words: heterogeneous network; device-to-device (D2D) communication; user equipment classification; spectrum shared allocation; coverage probability

1 引言

大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 和设备之间直接通信作为有前途的通信技术而备受第五代 (the Fifth Generation, 5G) 网络关注^[1]. 大规模 MIMO 是指为一个基站配备数百个或更多的天线, 并在一个时频资源块上为数十个用户设备 (User Equipment, UEs) 提供服务^[2]. 设备之间直接通信又称为设备到设备 (Device-to-Device, D2D) 通信^[3], 允许邻近的 UE 绕过基站直接建立通信链路, 这种短程通信具有高数据速率、高能量和频谱效率、低延迟以及改善小区边缘的性能等优点^[4]. D2D 通信可分为带外和带内 D2D^[5].

现阶段, 已有众多学者对 D2D 通信网络进行了研究. Azam^[6]等人对 D2D 用户功率分配的问题, 提出了一种最大化蜂窝网吞吐量和可接入用户数的联合最优算法; Wang^[7]等人分析了 D2D UEs 接入概率与设备间信道增益的关系, Ma^[8]等人通过建模联合模式选择、无线资源分配和功率协调问题, 并通过基站调度算法进行求解, 从而有效提高了 D2D 用户的传输速率. Wen^[9]等人通过建立联合模式选择和功率控制优化问题, 来实现系统中蜂窝用户和 D2D 用户能效最大化. 朱宸^[10]等人提出了一种基于链路间干扰辅助的中继 D2D 系统安全通信方法. 然而以上工作均未考虑多层异构网 (Heterogeneous Network, HetNet) 小小区中心化配置模式下的 D2D 通信网络, 也没有考虑这种多层网络对簇边缘 UE 的影响.

基于上述分析, 本文构造了一种基于泊松点过程 (Poisson Point Process, PPP) 和泊松簇过程 (Poisson Cluster Process, PCP) 的大规模 MIMO 辅助三层 D2D 混合 HetNet 模型, 提出了簇分类和频谱共享分配方案, 给出了目标 D2D 接收机 (D2D Receiver, D2D-Rx) 接收到的干扰以及干扰的拉氏变换, 并研究了 D2D-Rx 的覆盖概率.

2 网络建模和信道假设

考虑一个混合 D2D 通信的三层异构网络 (Heterogeneous Network, HetNet), 其由宏基站 (Macro Base Station, MBS)、PBS 和毫微微基站 (Femto Base Station, FBS) 组成. MBSs 配有 N_M 根大规模 MIMO 天线, PBSs 配有 N_P 根传统 MIMO 天线, FBSs 和 UEs 配备单天线. 利用简单的线性迫零波束成形, 每个 MBS 和 PBS 可以同时分别与 S_M 和 S_P 个 UEs 通信. MBS、PBS、FBS 和 D2D-Tx 的发射功率分别为 P_M 、 P_P 、 P_F 和 P_D ; R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 分别是 MBS、PBS、FBS 和 D2D-Tx 的覆盖半径. 目标 UE 既可以在蜂窝网络通信模式下工作又可以在 D2D 通信模式下工作, 本文主要研究 D2D 通信模式. 目标

UE 被划分为 D2D-Rx 的概率为 q , 并且 D2D-Tx 包含目标 D2D-Rx 请求内容的概率为 p .

MBSs 和 PBSs 的位置分别被建模为独立的 PPP Φ_M 和 Φ_P , 其密度分别为 λ_M 和 λ_P . FBSs 的位置被建模成密度为 λ_F 的托马斯簇过程 (Thomas Cluster Process, TCP) Θ_F , Φ_P 为父点过程. 在 PBS 覆盖区域内的 FBS 点称为簇中心 FBSs, 将其建模为 TCP $\Xi_F^{R_2} \triangleq \bigcup_{y \in \Theta_F} b(y, R_2)$, 则余下的 FBS 点称为簇边缘 FBSs, 建模为泊松洞过程 (Poisson Hole Process, PHP) $\Psi_F^{R_2} = \{x \in \Theta_F: x \notin \Xi_F^{R_2}\} = \Theta_F \setminus \Xi_F^{R_2}$, 其中 $b(y, R_2)$ 是以 y 所在的位置为中心, 以 R_2 为半径的圆 (球). UEs 的位置遵循密度为 λ_U 的任意独立点过程 Θ_U . 此外, 在 PBS 覆盖区域内的 UEs 点称为簇中心 UEs, 将其建模为 TCP $\Xi_U^{R_2} \triangleq \bigcup_{y \in \Theta_U} b(y, R_2)$, 则余下的 UEs 点称为簇边缘 UEs, 建模为 PHP $\Psi_U^{R_2} = \{x \in \Theta_U: x \notin \Xi_U^{R_2}\} = \Theta_U \setminus \Xi_U^{R_2}$. 距离为 $\|x\|$ 的无线信道路径损耗建模为 $\beta(\|x\|)^{-\alpha}$, 其中, α 是路径损耗指数, β 是频率相关的常数. 小规模衰落被建模为独立同分布单位平均功率的瑞利衰落. 本文考虑干扰限制模型, 用信号与干扰的比值 (Signal-to-Interference Ratio, SIR) 来估计网络的性能.

2.1 簇分类准则

基于簇的 UEs (BSs) 分类方法的基本思想是根据 UEs (BSs) 是否位于 PBS 的覆盖范围分为簇中心和簇边缘 UEs (BSs), 具体有: (1) 簇中心 UEs Φ_{CUE} 是 PBS 覆盖范围内 UEs 点的集合, 簇边缘 UEs Φ_{EUE} 是剩余 UEs 点的集合; (2) 簇中心 FBSs Φ_{CFB} 是位于 PBSs 覆盖范围内的 FBSs 集合, 簇边缘 FBSs Φ_{EFB} 是剩余 FBSs 集合; (3) 簇中心宏小区 UEs (Macro Cell UEs, MUEs)、微微小区 UEs (Pico Cell UEs, PUEs) 和毫微微小区 UEs (Femto Cell UEs, FUEs) Φ_{CMU} 、 Φ_{CPU} 和 Φ_{CFU} 分别表示与 MBSs、PBSs 和 FBSs 级联的簇中心 UEs 的集合; (4) 簇边缘 MUEs 和 FUEs Φ_{EMU} 和 Φ_{EFU} 分别表示与 MBSs 和 FBSs 级联的簇边缘 UEs 的集合; (5) 簇中心 D2D-Tx 和簇边缘 D2D-Tx Φ_{CDT} 和 Φ_{EDT} 分别表示簇中心和簇边缘 D2D-Tx 的集合; (6) 簇中心 D2D-Rx 和簇边缘 D2D-Rx 过程 Φ_{CDR} 和 Φ_{EDR} 分别表示簇中心和簇边缘 D2D-Rx 的集合.

2.2 UEs 接入的频谱分配

根据带宽分配因子 μ , 频谱共享分配策略将可用的总带宽 W 分成两个正交的子带 $W_1 = \mu W$ 和 $W_2 = (1 - \mu)W$. 子带 W_1 分配给所有为簇中心 UEs 提供服务的 PBS, 子带 W_2 分配给为簇边缘 UEs 提供服务的 MBS. 本文还采用了共享频谱分配策略, 簇中心 FBSs 与 MBSs 共享子带 W_2 , 簇边缘 FBSs 与 PBSs 共享子带 W_1 . 由于 D2D-Tx 具有较低的传输功率, 因此将子带 W_1 分配给所

有的 D2D-Tx.

3 D2D 网络的干扰统计描述

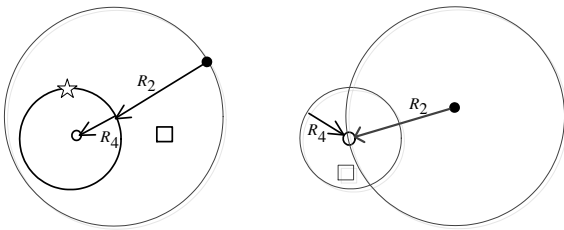
3.1 簇中心 D2D-Rx 干扰分布

由于所有的 D2D-Tx 与 PBS、簇边缘 FBS 共享子带 W_1 , 目标簇中心 D2D-Rx 接收到的干扰 I_{CDU} 为:

$$I_{CDU} = I_{CDU}^{CDT} + I_{CDU}^{EDT} + I_{CDU}^P + I_{CDU}^{EF} \quad (1)$$

I_{CDU}^{CDT} 是来自簇中心 D2D-Tx 的干扰, 由图 1(a) 有 $I_{CDU}^{CDT} = \sum_{x_p \in \Phi_p \cap b(0, R_2 + R_4)} \sum_{y_c \in (B^{x_p} \cap b(0, R_4)) \setminus \mathcal{C}_D} P_D h_{y_c} \beta \|x_p + y_c\|^{-\alpha}$.

I_{CDU}^{EDT} 是来自簇边缘 D2D-Tx 的干扰, 由图 1(b) 有 $I_{CDU}^{EDT} = \sum_{y_n \in \Phi_{EDT} \cap b(0, R_4)} P_D h_{y_n} \beta \|y_n\|^{-\alpha}$. 来自 PBS 的干扰 $I_{CDU}^P = \sum_{x_p \in \Phi_p \cap b(0, R_2)} \frac{P_P}{S_P} g_{x_p} \|x_p\|^{-\alpha}$, 其中 $g_{x_p} \sim \Gamma(S_P, 1)$. 来自 FBS 的干扰 $I_{CDU}^{EF} = \sum_{y_n \in \Phi_{FBS} \cap b(0, R_3)} P_F h_{y_n} \beta \|y_n\|^{-\alpha}$. 可得 I_{CDU} 的拉氏变换, 即命题 1.



□ 干扰 D2D-Tx ○ 目标 D2D-Rx ☆ 服务 BS ● 簇中心
(a) I_{CDU}^{CDT} 的插图 (b) I_{CDU}^{EDT} 的插图

图 1 目标 D2D-Rx 的 D2D-Tx 覆盖区域图

命题 1 聚合干扰 I_{CDU} 的拉氏变换为:

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}}(s) = \mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s) \mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s) \mathcal{L}_{I_{CDU}^P}(s) \mathcal{L}_{I_{CDU}^{EF}}(s) \quad (2)$$

式中 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s)$ 、 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s)$ 、 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^P}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EF}}(s)$ 分别如下:

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s) = \exp \left\{ -2\pi\lambda_p \int_0^{R_2+R_4} \left(1 - \exp(-pq\bar{c}_D \times \int_0^{R_4} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{r} e^{-\bar{r}^2} d\theta d\bar{r}}{1 + sP_D\beta(\bar{r}^2 + r^2 - 2r\bar{r}\cos\theta)^{-\alpha/2}}) \right) r dr \right\} \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s) = \exp \left(-\pi(pq\bar{c}_D\lambda_p)(R_4^2) {}_2F_1 \left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 + \frac{2}{\alpha}; (sP_D\beta)^{-1} R_4^\alpha \right) \int_{R_2}^\infty \exp \left(\int_{v_1 - R_2}^{v_1 + R_2} \arccos \left(\frac{r^2 + v_1^2 - R_2^2}{2v_1 r} \right) \right) \right) \quad (4)$$

$$\frac{2pq\bar{c}_D\lambda_p r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha} \times 2\pi\lambda_p v_1 \exp \left(-\pi\lambda_p (v_1^2 - R_2^2) \right) dv_1$$

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^P}(s) = \exp \left\{ -2\pi\lambda_p \sum_{v_1=1}^{S_P} \binom{S_P}{v_1} \left(\frac{sP_P\beta}{S_P} \right)^{v_1 - S_P} \frac{R_2^{\alpha(S_P + 2/\alpha - v_1)}}{\alpha(S_P - v_1 + 2/\alpha)} {}_2F_1 \left(S_P, S_P - v_1 + 2/\alpha; \right) \right. \quad (5)$$

$$\left. S_P - v_1 + 2/\alpha + 1; -\left(\frac{sP_P\beta}{S_P} \right)^{-1} R_2^\alpha \right\}$$

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EF}}(s) = \exp \left(-(\pi\bar{c}_F\lambda_p R_3^2) {}_2F_1 \left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 + \frac{2}{\alpha}; (sP_F\beta)^{-1} R_3^\alpha \right) \int_{R_2}^\infty \exp \left(\int_{v_1 - R_2}^{v_1 + R_2} \arccos \left(\frac{r^2 + v_1^2 - R_2^2}{2v_1 r} \right) \right) \right) \quad (6)$$

$$\frac{2\bar{c}_F\lambda_p r dr}{1 + (sP_F\beta)^{-1} r^\alpha} \left. 2\pi\lambda_p v_1 \exp \left(-\pi\lambda_p (v_1^2 - R_2^2) \right) dv_1 \right.$$

命题 1 证明

根据干扰链路的独立假设和信道增益服从瑞利衰落假设 $h_{y_c} \sim \exp(1)$, 干扰 I_{CDU}^{CDT} 的拉氏变换写为:

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s) \stackrel{(a)}{=} E_{\Phi_p} \left\{ \prod_{x_p \in \Phi_p \cap b(0, R_2 + R_4)} \exp \left(-pq\bar{c}_D \int_{\mathbb{R}^2 \cap b(0, R_4)} \frac{f_{y_c}(y_c) dy_c}{1 + sP_D\beta \|x_p + y_c\|^{-\alpha}} \right) \right\} \quad (7)$$

式中(a)通过对 TCP 中的单个簇应用概率生成函数获得^[11,12]. 每个簇中 D2D-Tx 的平均数是 $pq\bar{c}_D$, 其中 \bar{c}_D 是簇中 UEs 的平均数. 然后, 将笛卡尔应用于极坐标系, 可得 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s)$.

在假设所有发射机独立的情况下, 干扰 I_{CDU}^{EDT} 的拉氏变换 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s)$ 为:

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s) = E_{\Phi_p} \left\{ \exp \left(-pq\lambda_U \int_{\mathbb{R}^2 \cap b(0, R_4) \cap E_{R_2}^c} \frac{sP_D\beta \|y_n\|^{-\alpha}}{1 + sP_D\beta \|y_n\|^{-\alpha}} dy_n \right) \right\}$$

$$\stackrel{(a)}{=} \underbrace{\exp \left(-2\pi pq\lambda_U \int_0^{R_4} \frac{r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha} \right)}_{A_{CDU}^{EDT}} \times E_{\Phi_p} \left\{ \underbrace{\exp \left(\int_{E_{R_2}} \frac{pq\lambda_U dy_n}{1 + (sP_D\beta)^{-1} \|y_n\|^{-\alpha}} \right)}_{B_{CDU}^{EDT}} \right\} \quad (8)$$

式中 $E_{R_2} = \bigcup_{\mathbf{y} \in \Phi_p} b(\mathbf{y}, R_2)$ 是半径为 R_2 的洞的覆盖区域, $E_{R_2}^c$ 是 E_{R_2} 的补充, (a) 利用坐标转换, $A_{I_{CDU}^{EDT}}$ 进一步写为:

$$A_{I_{CDU}^{EDT}} \stackrel{(b)}{=} \exp\left(-\pi(pq\lambda_U)(R_4^2) {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 + \frac{2}{\alpha}; (sP_D\beta)^{-1} R_4^\alpha\right)\right) \quad (9)$$

式中 (b) 通过应用文献 [13] 中的 (3.194.1) 而得到, ${}_2F_1(\dots; \dots)$ 是由文献 [13] 中的 (9.14.2) 定义.

$B_{I_{CDU}^{EDT}}$ 为:

$$B_{I_{CDU}^{EDT}} = \exp\left(-2\pi\lambda_P \int_{R_2}^{\infty} \left(1 - \exp\left(-2pq\lambda_U \int_{v-R_2}^{v+R_2} \frac{\arccos\left(\left(r^2 + \|\mathbf{x}_p\|^2 - R_2^2\right)/2vr\right) r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha}\right) v dv\right) \quad (10)$$

为了进一步计算式(10), 本文只考虑一个洞, 即最接近目标点的孔. \mathbf{x}_{p_1} 表示最近洞的位置, 这种情况下的干扰区域是 $\Phi_p \cap b(\mathbf{y}, R_2)$. 因为目标 UE(D2D-Rx) 总是位于洞的外面, 所以 Φ_p 的最近点至少离洞有一段距离 R_2 . 距离 $v_1 = \|\mathbf{x}_{p_1}\|$ 的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 可以写为 $f_{v_1}(v_1) = 2\pi\lambda_p v_1 \exp\left(-\pi\lambda_p(v_1^2 - R_2^2)\right)$, $v_1 > R_2$. 由于本文只考虑主要干扰, 故式(10)可以表示为:

$$B_{I_{CDU}^{EDT}} = \int_{R_2}^{\infty} \exp\left(\int_{v_1-R_2}^{v_1+R_2} \left(\arccos\left(\frac{r^2 + v_1^2 - R_2^2}{2v_1 r}\right)\right) \frac{2pq\lambda_U r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha}\right) \times 2\pi\lambda_p v_1 \exp\left(-\pi\lambda_p(v_1^2 - R_2^2)\right) dv_1 \quad (11)$$

将式(9)和(11)代入式(8), 可得 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EDT}}(s)$.

在式(1)中, $g_{X_p} \sim \Gamma(S_p, 1)$, 故 I_{CDU}^P 的拉氏变换为:

$$\mathcal{L}_{I_{CDU}^P}(s) \stackrel{(a)}{=} E_{\Phi_p} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p \cap b(0, R_2)} \left(1 + \frac{sP_p\beta}{S_p} \|\mathbf{x}_p\|^{-\alpha}\right)^{-S_p} \right\} \quad (12)$$

式中 (a) 使用文献 [13] 中的 (3.351.1). 利用文献 [13] (3.194.2) 可得 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^P}(s)$. 将式(10)中的变量 P_F, R_3 和 λ_F 替换为 P_U, R_4 和 $P\lambda_U$ 可以得到干扰 I_{CDU}^{EF} 的拉氏变换 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{EF}}(s)$.

3.2 簇边缘 D2D-Rx 干扰分布

目标簇边缘 D2D-Rx 接收到的干扰可写为:

$$I_{EDU} = I_{EDU}^{EDT} + I_{EDU}^{CDT} + I_{EDU}^P + I_{EDU}^{EF} \quad (13)$$

簇边缘 D2D-Tx 的干扰

$$I_{EDU}^{EDT} = \sum_{\mathbf{y}_n \in \Phi_{EDT} \cap b(0, R_4) \setminus E_D^c} P_D h_{\mathbf{y}_n} \|\mathbf{y}_n\|^{-\alpha},$$

用与式(8)类似的准则, 可得到 I_{EDU}^{EDT} 的拉氏变换:

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^{EDT}}(s) = \underbrace{\exp\left(-2\pi pq\lambda_U \int_0^{R_4} \frac{r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha}\right)}_{A_{I_{EDU}^{EDT}}} \times \underbrace{E_{\Phi_p} \left\{ \exp\left(\int_{E_{R_2}} \frac{pq\lambda_U d\mathbf{y}_n}{1 + (sP_D\beta)^{-1} \|\mathbf{y}_n\|^\alpha}\right) \right\}}_{B_{I_{EDU}^{EDT}}} \quad (14)$$

在式(14), 使用文献 [13] 中 (9.14.2) 定义的高斯超几何函数 ${}_2F_1(\dots; \dots)$, 则第一部分 $A_{I_{EDU}^{EDT}}$ 可表示为式(21), $B_{I_{EDU}^{EDT}}$ 为:

$$B_{I_{EDU}^{EDT}} = E_{\Phi_p} \left\{ \prod_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p} \exp\left(2pq\lambda_U \int_{\|\mathbf{x}_p\| - R_2}^{\|\mathbf{x}_p\| + R_2} \frac{\arccos\left(\left(r^2 + \|\mathbf{x}_p\|^2 - (R_2 - R_4)^2\right)/2\|\mathbf{x}_p\|r\right) r dr}{1 + (SP_D\beta)^{-1} r^\alpha}\right) \right\} \quad (15)$$

由于目标 D2D-Rx 总是位于半径 $R_2 - R_4$ 的洞之外, 因此 Φ_p 最近点至少离它的距离为 $R_2 - R_4$. 利用这个事实和随机几何的理论, 距离 $v_1 = \|\mathbf{x}_p\|$ 的 PDF 可以表示为 $f_{v_1}(v_1) = 2\pi\lambda_p v_1 \exp\left(-\pi\lambda_p(v_1^2 - (R_2 - R_4)^2)\right)$ 其中, $v_1 > R_2 - R_4$, 因此, 代入该 PDF, 得 $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{EDT}}(s)$:

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^{EDT}}(s) = \exp\left(-\pi(pq\lambda_U)(R_4^2) {}_2F_1\left(1, \frac{2}{\alpha}; 1 + \frac{2}{\alpha}; (sP_D\beta)^{-1} R_4^\alpha\right)\right) \times \int_{R_2 - R_4}^{\infty} \exp\left(2pq\lambda_U \times \int_{v_1 - (R_2 - R_4)}^{v_1 + (R_2 - R_4)} \frac{\arccos\left(\left(r^2 + v_1^2 - (R_2 - R_4)^2\right)/2v_1 r\right) r dr}{1 + (sP_D\beta)^{-1} r^\alpha}\right) \times 2\pi\lambda_p v_1 \exp\left(-\pi\lambda_p(v_1^2 - (R_2 - R_4)^2)\right) dv_1 \quad (16)$$

如图 2, 来自簇中心 D2D-Tx 的干扰 I_{EDU}^{CDT} 为:

$$I_{EDU}^{CDT} = \sum_{\mathbf{x}_p \in \Phi_p \cap \bar{b}(R_2 - R_4, R_2 + R_4)} \sum_{\mathbf{y}_c \in B^p \cap b(0, R_4)} P_D \times \beta h_{\mathbf{y}_c} \|\mathbf{x}_p + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha} \quad (17)$$

利用式(17), 干扰 I_{EDU}^{CDT} 的拉氏变换可表示为:

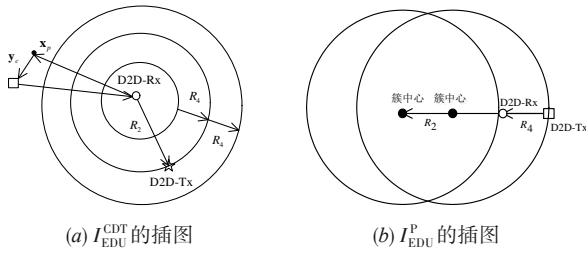


图2 I_{EDU}^{CDT} 和 I_{EDU}^P 的区域图

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s) = \mathbb{E}_{\phi_p} \left\{ \prod_{x_p \in \phi_p \cap \bar{B}(R_2 - R_4, R_2 + R_4)} \mathbb{E}_{B^{x_p}} \left\{ \prod_{y_c \in B^{x_p} \cap b(0, R_4)} \frac{1}{1 + sP_D\beta \|\mathbf{x}_p + \mathbf{y}_c\|^{-\alpha}} \right\} \right\} = \exp \left(-2\pi\lambda_p \int_{R_2 - R_4}^{R_2 + R_4} (1 - \frac{1}{1 + sP_D\beta \|\mathbf{r}\|^{-\alpha}}) r dr \right) \exp \left(-pq\bar{c}_D \int_0^{R_4} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{r}e^{-\bar{r}^2} d\bar{\theta}d\bar{r}}{1 + sP_D\beta (\bar{r}^2 + r^2 - 2\bar{r}r \cos \bar{\theta})^{-\alpha/2}} \right) \quad (18)$$

因 $\mathcal{L}_{I_{CDU}^{CDT}}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s)$ 有相似的形式, $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s)$ 可写为:

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s) = \exp \left(-2\pi\lambda_p \int_{R_2 - R_4}^{R_2 + R_4} (1 - \exp(-pq\bar{c}_D \frac{\bar{r}e^{-\bar{r}^2} d\bar{\theta}d\bar{r}}{1 + sP_D\beta (\bar{r}^2 + r^2 - 2\bar{r}r \cos \bar{\theta})^{-\alpha/2}})) r dr \right) \quad (19)$$

在式(13), PBS的干扰

$$I_{EDU}^P = \sum_{x_p \in \phi_p \cap b(R_2 - R_4, R_2)} \frac{P_p}{S_p} g_{x_p} \beta \|\mathbf{x}_p\|^{-\alpha}, \text{ 有:}$$

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^P}(s) = \mathbb{E}_{\phi_p} \left\{ \prod_{x_p \in \phi_p \cap b(R_2 - R_4, R_2)} \mathbb{E}_{g_{x_p}} \left\{ \exp \left(-\frac{sP_p}{S_p} g_{x_p} \beta \|\mathbf{x}_p\|^{-\alpha} \right) \right\} \right\} = \exp \left\{ -2\pi\lambda_p \sum_{v_1=1}^{S_p} \left(\frac{S_p}{v_1} \left(\frac{sP_p\beta}{S_p} \right)^{v_1} \frac{1}{\alpha} \int_{R_2 - R_4}^{R_2 + R_4} t^{v_1 - 2/\alpha - 1} \left(1 + \frac{sP_p\beta}{S_p} t \right)^{-S_p} dt \right) \right\} \quad (20)$$

簇边缘 FBS 干扰 $I_{EDU}^{EF} = \sum_{y_n \in \phi_{EFB} \cap b(0, R_3)} P_F h_{y_n} \beta \|\mathbf{y}_n\|^{-\alpha}$,

由于 I_{CDU}^{EF} 和 I_{EDU}^{EF} 形式相同, 所以其拉氏变换满足:

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}^{EF}}(s) = \mathcal{L}_{I_{CDU}^{EF}}(s) \quad (21)$$

命题2 聚合干扰 I_{EDU} 的拉氏变换为:

$$\mathcal{L}_{I_{EDU}}(s) = \mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s) \mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s) \mathcal{L}_{I_{EDU}^P}(s) \mathcal{L}_{I_{EDU}^{EF}}(s) \quad (22)$$

其中, $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s)$, $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{CDT}}(s)$, $\mathcal{L}_{I_{EDU}^P}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{EDU}^{EF}}(s)$ 分别由式(16)、

(19)~(21)给出.

4 D2D网络的SIR覆盖概率

当簇中心(或簇边缘) D2D-Rx 位于 $\mathbf{x}_D^{C(E)}$ 时, 且与级联距离为 $\mathbf{x}_D^{C(E)} = \|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|$ 的服务 D2D-Tx 级联, 则接收的瞬时信号功率为 $P_{D,r}(\|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|)$, 受到的干扰 $I_{C(E)DU}$ 由式(1)或(7)给出, 目标簇中心(或簇边缘) D2D-Rx SIR:

$$SIR_D^{C(E)}(\|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|) = \frac{P_D \beta h_{x_D^{C(E)}} \|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|^{-\alpha}}{I_{C(E)DU}} \quad (23)$$

因为 $h_{x_D^{C(E)}} \sim \exp(1)$, 故 SIR 覆盖概率为:

$$C_D^{C(E)}(\|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|) = \mathbb{E}_{X_D^{C(E)}} \left\{ \mathcal{L}_{I_{C(E)DU}}(s) \Big| s = \frac{\tau \|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|^{-\alpha}}{P_D \beta} \right\} \quad (24)$$

考虑概率密度函数 $f_{\|\mathbf{x}_D^{C(E)}\|}(\mathbf{x}) = \frac{2\mathbf{x}}{R_4^2}$. 因此有定理1.

定理1 在 D2D 模式下, 当目标簇中心(边缘) D2D-Rx 与簇中心 D2D-Tx 级联时, SIR 覆盖概率为:

$$C_D^{C(E)} = \int_0^{R_4} \mathcal{L}_{I_{C(E)DU}} \left(\frac{\tau \mathbf{x}^\alpha}{P_D \beta} \right) f_{X_D^{C(E)}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (25)$$

式中 $\mathcal{L}_{I_{CDU}}(s)$ 和 $\mathcal{L}_{I_{EDU}}(s)$ 分别由式(2)和(14)给出. D2D-Rx 的 SIR 总覆盖概率表达式:

$$C_D^{Tot} = A_D^{In} C_D^C + A_D^{Out} C_D^E \quad (26)$$

A_D^{In} 和 A_D^{Out} D2D-Rx 位于簇内部和簇外部的概率.

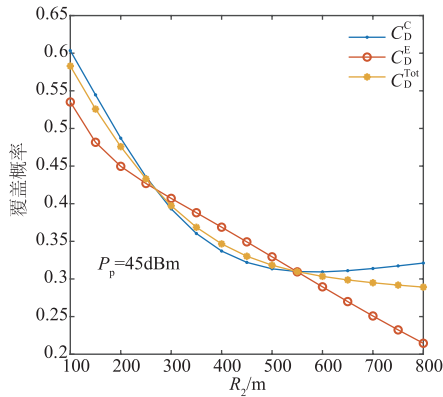
5 仿真和数值结果分析

本文考虑三层 HetNet 中小小区中心化配置模式下的 D2D 通信网络, 并分析簇边缘和簇中心 D2D-Rx 的 SIR 覆盖概率以及 D2D 网络总 SIR 覆盖概率. 若无特别说明, 在整个仿真过程中将使用表 1 所示的仿真参数值.

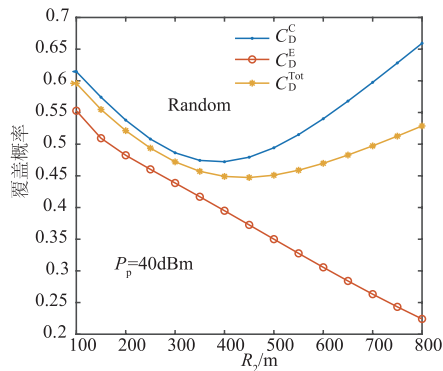
图 3 表明, C_D^C 在 R_2 较小的情况下随 R_2 的增大而

表1 仿真系统参数值

参数	取值	参数	取值
λ_M	$(1 \sim 10) / (\pi \times \text{km}^2)$	R_2	70~800m
λ_P	$\lambda_P = 10\lambda_M$	R_3	50~150m
τ	1.5	R_1, R_4	1000m, 30m
W	20MHz	N_M, S_M	80, 6
α	2	N_P, S_P	10, 2
P_M	20~46dBm	B_M, B_P, B_F	1
P_P	20~45dBm	δ_D^2	10~1000
P_F	30dBm	δ_F^2	10~1000
\bar{c}_D, \bar{c}_F	10, 4~6	p, q	0.5



(a) $P_p=45\text{dBm}$

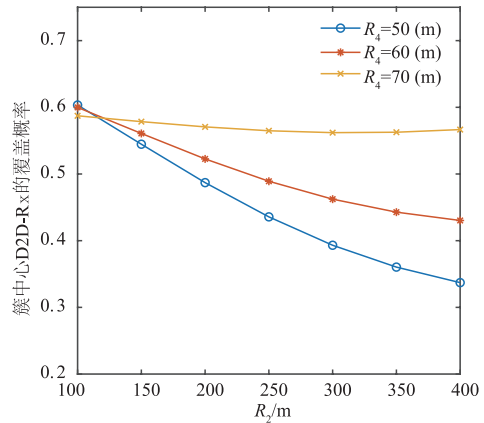


(b) $P_p=40\text{dBm}$

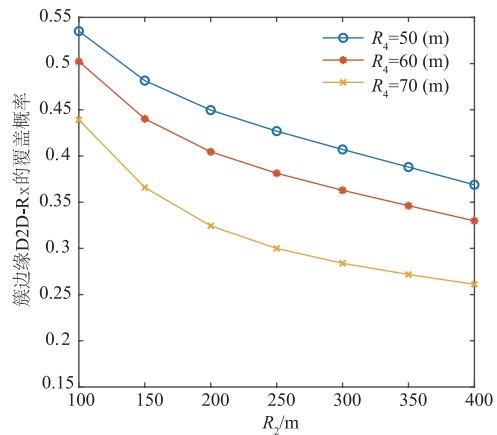
图 3 D2D 网络覆盖概率

减小,然后,随着 R_2 的增大而增加.与 C_D^C 不同, C_D^E 在 R_2 的整个范围内始终在减小,因此当 R_2 足够大时,有 $C_D^C > C_D^E$,当 R_2 很小(例如 $R_2 = 400\text{m}$)时, $C_D^C < C_D^E$ 是可能实现的.然而,当 R_2 足够小时,总有 $C_D^C > C_D^E$.对于这些观察,解释如下:一方面,当 R_2 较小时,在D2D-Tx的覆盖范围内,PBS和FBS的数量随着 R_2 的增加而增加,使得目标D2D-Rx受到的干扰增加.另一方面,当 R_2 较大时,随机分布的PBS数目饱和,FBS和D2D-Tx对 C_D^C 的影响较大且占主导地位.在此情况下, R_2 的增大表示从FBS和D2D-Tx到目标D2D-Rx的平均距离的增加,平均距离的增加导致了路径损耗的增加和干扰功率的减小,从而提高了覆盖概率 C_D^C .对于 C_D^E ,由于目标簇边缘D2D-Rx受到来自簇中心D2D-Tx的干扰总是增加的,因此导致覆盖概率 C_D^E 降低.此外,图3(a)和3(b)也给出了PBS的发送功率 P_p 的影响.

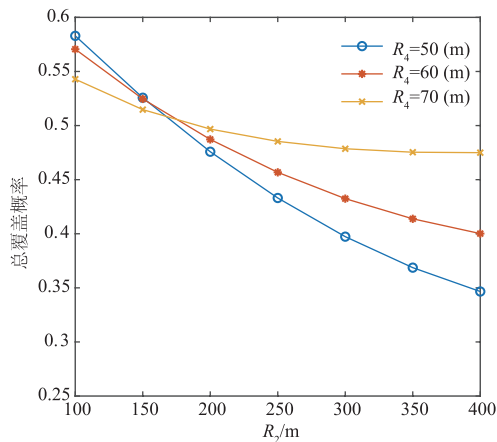
从图4可以看出,随着D2D-Tx覆盖半径 R_4 的增大, C_D^C 迅速增大,而 C_D^E 减小.原因在于, R_4 的增大表明更多的D2D-Tx远离目标簇中心D2D-Rx.相反,当D2D-Rx落在PBS的覆盖范围之外时, R_4 的增大表明目标D2D-Rx受到更多的干扰.然而,从图4(c)可以发现总



(a) C_D^C 与 R_2 关系图



(b) C_D^E 与 R_2 关系图



(c) C_D^{Tot} 与 R_2 关系图

图 4 不同 R_4 下覆盖概率的比较

覆盖概率 C_D^{Tot} 随 R_4 的增大而增加.结果表明,D2D网络的总覆盖性能主要受簇中心传输的影响,尤其是在大范围 R_2 内.

图5表明当服务D2D-Tx发射功率 P_D 较小时,由于来自其他D2D-Tx的干扰增加, C_D^C 和 C_D^E 都在减小.然而,当 P_D 较大时, C_D^C 和 C_D^E 逐渐趋于平稳.因为在此情

况下,来自服务 D2D-Tx 的信号比来自 MBS、PBS 和 FBS 的信号强得多.此外,图 5(a)、5(b)中存在一个值 P_D^* ,当传输功率 P_D 小于 P_D^* 时, C_D^E 大于 C_D^C ,否则 C_D^E 小于 C_D^C .

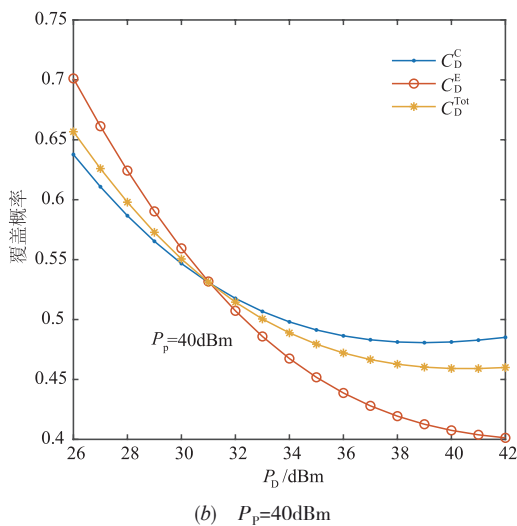
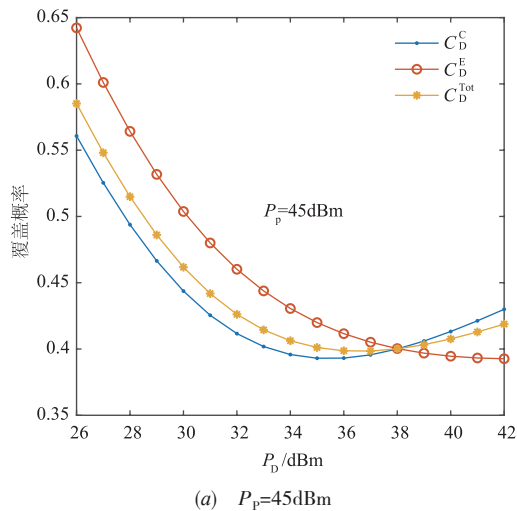


图 5 覆盖概率与 D2D-Tx 发射功率 P_D 的关系图

6 结束语

基于簇 UEs 分类和共享频谱分配构造了一个大规模 MIMO 辅助多层 D2D 混合 HetNet 模型,并分析了 D2D 通信网络的覆盖性能.当 D2D-Tx 的覆盖半径相对较小时,簇中心 D2D-Rx 的覆盖概率随着 PBS 覆盖半径的减小而减小;当 D2D-Tx 的覆盖半径相对较大时,簇中心 D2D-Rx 的覆盖概率先随着 PBS 覆盖半径的增大而减小,然后随着 PBS 覆盖半径的不断增大而增大,当且仅当 PBS 的覆盖半径较小时.同时,在 PBS 和 D2D-Tx 覆盖半径的整个范围内,目标簇边缘 D2D-Rx 的覆盖概率总是减小的.

参考文献

- [1] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(3): 1717 – 1755.
- [2] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590.
- [3] ANSARI R I, CHRYSOSTOMOU C, HASSAN S A, et al. 5G D2D networks: techniques, challenges, and future prospects [J]. IEEE Systems Journal, 2017, (99): 1 – 15.
- [4] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(4): 1801 – 1819.
- [5] LIU J, KATO N, MA J, et al. Device-to-device communication in LTE-advanced networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1923 – 1940.
- [6] AZAM M, AHMAD M, NAEEM M, et al. Joint admission control, mode selection, and power allocation in D2D communication systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 75(9): 7322 – 7333.
- [7] WANG X X, LU S B, WANG X, et al. Greedy heuristic resource allocation algorithm for device-to-device aided cellular systems with system level simulations [J]. Transactions on Internet and Information Systems, 2018, 12(4): 1415 – 1435.
- [8] MA R F, XIE N, CHEN H H, et al. Mode selection, radio resource allocation, and power coordination in D2D communications [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(3): 112 – 121.
- [9] WEN D Z, YU G D, XU L K. Energy efficient mode selection and power control for device-to-device communications [A]. Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. New York: IEEE Press, 2017. 1 – 7.
- [10] 朱宸, 黄开枝, 康小磊, 等. 基于链路间干扰辅助的中继 D2D 系统安全通信方法 [J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1443 – 1448.
ZHU C, HUANG K Z, KANG X L, et al. Jamming based secure relay-aided D2D transmission method [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1443 – 1448. (in Chinese)
- [11] CHIU S, STOYAN D, KENDALL W, MECKE J. Stochastic Geometry and Its Applications [M]. United King-

dom: John Wiley & Sons, 2013.

- [12] GANTI R K, HAENGGI M. Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9): 4077 – 4087.

- [13] GRADSHTEYN I, RYZHIK I. Table of Integrals, Series, and Products (7th ed) [M]. Academic: San Diego, CA, 2007.

作者简介



吕亚平 女, 1994年11月出生于河南省商丘市. 2018年在河南师范大学获得工学学士学位, 现为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异构网络、大规模MIMO、D2D通信等关键技术.

E-mail: 1059223738@qq.com



贾向东(通信作者) 男, 1971年8月出生于甘肃省定西市. 教授、博士后. 1996年、2007年、2012年分别于西北师范大学、合肥大学和南京邮电大学获得工学学士、工学硕士和工学博士学位. 发表SCI、EI收录论文100余篇. 研究方向为5G、移动与无线通信关键理论和技术.

E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn