

异构网络中 D2D 资源分配算法*

薛建彬^{1,2}, 郭玉晶¹

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对蜂窝用户和终端直通(D2D)用户构成的异构网络中频谱资源利用率低和同频干扰严重的问题,提出了一种新的资源分配方案。为限制D2D用户对基站接收蜂窝用户信号产生干扰,提出了基站端保护区域的概念,通过对保护区域外的D2D用户进行分组,减小了D2D用户链路间的相互干扰,并实现了多个D2D用户复用蜂窝用户上行资源进行通信的场景,最后,基于中断概率为每个D2D用户分组选择蜂窝用户资源进行复用,以保证蜂窝用户的通信质量。仿真结果表明:所提算法不仅可以有效降低用户之间的同频干扰,还可以允许更多的D2D用户接入,提高系统吞吐量,并提升系统公平性。

关键词: 终端直通(D2D); 资源分配; 区域; 模糊聚类; 吞吐量; 公平性

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2020)02-0128-04

D2D resource allocation algorithm in heterogeneous networks*

XUE Jianbin^{1,2}, GUO Yujing¹

(1. College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the low utilization of spectrum resources problem and co-channel interference problem in heterogeneous network composed of cellular users and device-to-device(D2D) users, a new resource allocation scheme is proposed. To limit the interference of the D2D users to the receiving of the cellular user signals by the base station, the concept of the protection area of the base station is proposed. And then the D2D users outside the protected area are grouped, thereby reduce the mutual interference between the D2D user links, and achieve more D2D user multiplexes a cellular user uplink resource for communication. Finally, selecting cellular user resources for multiplexing for each D2D user group based on the outage probability, to ensure the communication quality of the cellular user. The simulation results show that the proposed algorithm not only can effectively reduce the co-channel interference between users, but also allows more D2D users to access, improve system throughput and improve system fairness.

Keywords: device-to-device(D2D); resource allocation; area; fuzzy clustering; throughput; fairness

0 引言

近年来,由于移动用户的爆炸式增长,使得用户对多媒体业务的需求急剧增加,传统的蜂窝通信已无法满足5G通信需求。因此,高速率的数据传输对于保证移动无线通信系统的服务质量尤为重要^[1-2]。终端直通(device-to-device, D2D)通信是一种在蜂窝系统控制下,实现两个近距离终端用户不通过基站直接进行通信的技术。其特点是减少系统功耗,降低基站负载,提高频谱利用率以及增加系统吞吐量。因此,在蜂窝网络中引入D2D通信技术至关重要^[3-6]。然而,当D2D用户在复用蜂窝用户的资源时,D2D

用户和蜂窝用户之间会产生复杂的同频干扰,当用户之间的干扰严重时会影响用户的通信质量甚至导致通信中断。因此,如何给用户进行资源分配以提高频谱效率,减小用户之间的同频干扰,从而确保用户的通信质量和提高系统性能具有重要的研究意义。

D2D用户通过非正交的方式复用蜂窝用户的资源进行通信,为有效减少该复用模式下产生的用户之间的同频干扰。文献[9]提出一种Stackelberg算法,将蜂窝用户和D2D用户分组为买方-卖方,其中,基站通过设定价格以限制其遭受的干扰并最大化收益,D2D用户通过给定的价格

收稿日期:2018-09-11

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61461026);东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(2014D13)

竞争资源以最大化个体效用。但文献 [9] 只允许一个 D2D 用户对复用一個蜂窝用户的频谱资源, 没有考虑系统的公平性。文献 [10] 利用超图着色理论进行信道分配以控制蜂窝用户和 D2D 用户之间的干扰, 并且允许任意数量的 D2D 用户对与蜂窝用户共享频谱资源。然而, 文献 [9, 10] 没有考虑通过资源分配最大化系统的吞吐量。文献 [11] 提出 D2D 组播方案最大化系统吞吐量, 其通过考虑社会属性和物理因素确定 D2D 组播集群, 然后对功率和信道分配进行联合优化。

考虑到上述问题, 本文提出一个新的资源分配方案, 本文提出的算法优势在于: 不仅保证了蜂窝用户和 D2D 用户的通信质量, 还减少了蜂窝用户与 D2D 用户之间复杂的同频干扰, 与此同时, 实现了多个 D2D 用户复用一個蜂窝用户的场景, 增加了系统吞吐量, 提高了系统公平性。

1 系统模型

考虑单小区中多个 D2D 用户复用蜂窝用户资源的情况, 建立如图 1 所示系统模型, 假设系统中基站和用户都配置单全向天线。为不失一般性, 系统包含一个位于小区中心的基站 (eNodeB), N 个蜂窝用户, 记为集合 $C = \{1, 2, \dots, M\}$, M 个 D2D 用户对, 记为集合 $D = \{1, 2, \dots, N\}$, 其中, $\sqrt{M} < N < M$ 。该系统中所有 D2D 用户对复用蜂窝用户的 UL 频谱资源。假设系统内所有蜂窝用户和 D2D 用户对都服从均匀分布, 且基站可以获取所有用户的位置信息。本文不仅考虑了路径损耗模型, 还考虑了多径效应产生的快衰落和阴影效应产生的慢衰落对于系统的影响, 因此, D2D 用户对发射端 DT_j 到基站端的信道增益表示为

$$H_j^D = PL_0 f_{j,B} S_{j,B} D^{-\alpha} \quad (1)$$

式中 PL_0 和 α 分别为由蜂窝系统决定的路径损耗常数和路径损耗指数, $f_{j,B}$ 和 $S_{j,B}$ 分别为 D2D 用户对发射端 DT_j 到基站端的快衰落增益和慢衰落增益, D 为 D2D 用户对发射端 DT_j 到基站端的距离。

多个 D2D 用户复用一個蜂窝用户 UL 频谱资源的场景, 与一個 D2D 用户复用一個蜂窝用户场景相比较, 虽然提高了系统的频谱利用率, 但同时造成了复杂的同频干扰问题, 具体情况如图 1 所示。

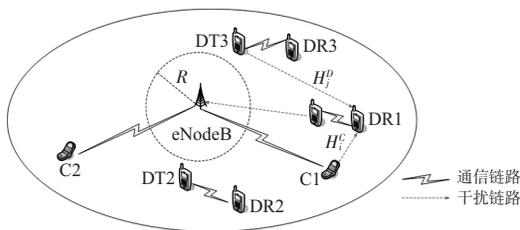


图 1 系统模型

D2D 用户对复用蜂窝用户 C_i 的 UL 频谱资源时, 基站会受到 D2D 用户对发送端 DT_j 的干扰, 同时 D2D 用户对接收端 DR_j 会受到蜂窝用户 C_i 和其他 D2D 用户对发送端 DT_j 的干扰。则基站端信干噪比 (SINR) 表示为

$$SINR_i^c = \frac{P_i^c G_i}{\sum_{j \in D} w_{j,i} p_j^D H_j^D + \sigma_0^2} \quad (2)$$

式中 P_i^c 和 p_j^D 分别为第 i 个蜂窝用户和第 j 个 D2D 用户复用蜂窝用户 UL 资源的发射功率, G_i 为蜂窝用户到基站端的信道增益, H_j^D 为第 j 个 D2D 用户对发送端到基站的信道增益, σ_0^2 为高斯白噪声功率, $w_{j,i}$ 为 D2D 用户对 j 是否复用蜂窝用户 UL 频谱资源, 当 D2D 用户对 j 复用蜂窝用户 UL 频谱资源时 $w_{j,i} = 1$, 否则 $w_{j,i} = 0$ 。D2D 用户对接收端 DR_j 信干噪比 (SINR) 表示为

$$SINR_j^D = \frac{p_j^D G_j}{\sum_{j' \in D} w_{j',j} p_{j'}^D H_{j'}^D + P_i^c H_i^c + \sigma_0^2} \quad (3)$$

式中 p_j^D 为第 j 个 D2D 用户复用蜂窝用户 UL 资源的发射功率, G_j 为 D2D 用户对 j 之间的信道增益, $H_{j'}^D$ 为第 j' 个 D2D 用户对发送端到第 j 个 D2D 用户对接收端的信道增益, H_i^c 为蜂窝用户到第 j 个 D2D 用户对接收端的信道增益。根据香农公式可得蜂窝用户和 D2D 用户的总吞吐量为

$$C = \log_2(1 + SINR_i^c) + \sum_{j \in D} w_{j,i} \log_2(1 + SINR_j^D) \quad (4)$$

本文的目标是在满足蜂窝用户和 D2D 用户的通信质量前提下最大化系统吞吐量, 因此可以数学建模为

$$\begin{aligned} \max_{w_{j,i}, P_i^c, p_j^D} & \sum_{i \in C, j \in D} \{C\} \\ \text{s. t. } & C_1: SINR_i^c \geq SINR_{i, \min}^c, \forall i \in C \\ & C_2: SINR_j^D \geq SINR_{j, \min}^D, \forall j \in D \\ & C_3: w_{j,i} \in \{0, 1\}, \forall i \in C, j \in D \\ & C_4: \sum_{i \in C} w_{j,i} = 1, \forall j \in D \end{aligned} \quad (5)$$

式中 C_1 和 C_2 分别满足了蜂窝用户和 D2D 用户的通信质量要求, C_3 和 C_4 表明了每个 D2D 用户最多只能复用一個蜂窝用户的 UL 频谱资源。

2 资源分配

2.1 保护区域

由于 D2D 用户复用蜂窝用户的 UL 频谱资源时基站会受到 D2D 用户发送端的干扰, 因此, 为了保证蜂窝用户能够正常通信, 限制 D2D 用户发送端对基站的干扰, 本文提出在基站端设置保护区域, 在该区域内禁止 D2D 用户通信。保护区域的大小由保护半径决定, 定义保护半径 R 为在监察当局设置的干扰温度限制 (interference temperature limit, ITL) 条件下, D2D 用户发送端到基站的最小距离

$$R = \inf\{r \in D \mid I_{d,B} \leq ITL\} \quad (6)$$

式中 $I_{d,B}$ 为 D2D 用户发送端对基站产生的干扰, 由 D2D 用户的最大发射功率 $P_{j, \max}^D$ 和 D2D 用户发送端到基站的信

道增益决定,即 $I_{dB} = P_{j,max}^D H_j^D$, 联合式(1)和式(10)求解得保护半径

$$R = \left(\frac{\Delta f_{j,B} S_{j,B} P_{j,max}^D}{ITL} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \leq D \quad (7)$$

基于以上分析可得:随着 D2D 用户发送功率的增大,为了满足干扰温度阈值 $I_{dB} \leq ITL$,需要相应增大保护区域的保护半径。

2.2 D2D 用户加权模糊聚类分组

基于第一节系统模型,给保护区域外的 D2D 用户进行分组,其中 D2D 用户分组集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。传统的模糊聚类分组算法是一个使各数据点到各聚类中心的加权距离平方和最小化的迭代求解过程。基于此算法,本文提出将 n 个 D2D 用户按照复用同一蜂窝用户 UL 频谱资源且距离较远的原则分为 C 组,模糊聚类分组数满足 $2 < c < \sqrt{n}^{[11]}$ 。聚类分组的过程中要保证每个用户分组中至少包含两个 D2D 用户对,并设定 D2D 用户分组间的最小距离为 ε 。为不失一般性,假设系统内的 D2D 用户具有以下属性:1) D2D 用户位置信息;2) D2D 用户 SINR 要求;3) D2D 用户速率要求,各属性值根据系统实际观测统计确定。考虑到 D2D 用户各属性值对分组的不同影响,本文引入特征加权

系数 Ω_k ,并满足 $\sum_{k=1}^n \Omega_k = 1$,将上述问题表示成数学问题

$$J_m(u, w) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \frac{1}{\Omega_k(\mu_{ik})^m \|x_k - x_i\|^2} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } u \in M_D$$

式中 $u = [\mu_{ik}]_{n \times c}$ 为模糊分组矩阵, $w = \{w_1, w_2, \dots, w_c\}$ 为聚类中心, μ_{ik} 为 D2D 用户 x_k 属于分组的隶属度, $m \in (1, \infty)$ 为模糊指数, m 越大模糊程度越高, $\|x_k - x_i\|$ 为 D2D 用户 k 和 D2D 用户 i 之间的距离, M_D 满足

$$M_D = \left\{ U \in R^{n \times c} \left| \begin{array}{l} u_{ik} \in [0, 1], \forall i, k \\ \sum_i u_{ik} = 1, \forall k \\ 0 < \sum_k u_{ik} < n, \forall i \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

利用拉格朗日乘子法构造拉格朗日目标函数

$$L(u, w, \lambda) = \sum_{i=1}^c \frac{1}{\Omega_k(\mu_{ik})^m \|x_k - x_i\|^2} + \lambda \left(\sum_{i=1}^c -1 \right) \quad (10)$$

令式(10)各一阶偏导数为 0,求解得式(8)的优化迭代公式

$$\mu_{ik} = \left[\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|x_k - x_i\|}{\|x_k - x_j\|} \right)^{\frac{2}{m+1}} \right]^{-1} \quad (11)$$

$$w_i = \left(\sum_{i=1}^c \Omega_k(\mu_{ik})^{-m} x_k \right) / \sum_{i=1}^c \Omega_k(\mu_{ik})^{-m}$$

一个 D2D 用户复用一个蜂窝用户频谱资源时,除了频

谱利用率不高和系统吞吐量低,系统公平性也较低。因此,实现多个 D2D 用户复用一个蜂窝用户不仅可以提高频谱利用率,增加系统吞吐量,而且还能提高系统公平性。本文通过 Jains 公平性评估标准分析 D2D 用户的公平性

$$Fair_j(n) = \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 / \left(n \sum_{j=1}^n x_j^2 \right) \quad (12)$$

式中 x_j 为 D2D 用户 j 的传输速率, n 为系统内 D2D 用户数量。因此,当 D2D 用户数据传输速率越平均,系统的公平性就越高。

2.3 中断概率分析

基于以上分组结果,为了保证被复用资源的蜂窝用户 QoS 需求,本文通过中断概率为每个 D2D 用户组选择一个蜂窝用户进行资源复用。通过比较被复用资源的蜂窝用户 SINR 与其门限值 β_i 的值,将 SINR 作为是否可以被 D2D 用户复用的准则。被复用资源的蜂窝用户的 SINR 表示为

$$\gamma_i^c = \frac{P_i^c G_i}{p_j^D H_j^D + \sigma_0^2} \quad (13)$$

考虑到通信可靠性,本文设定中断概率上限为 ε_i ($\varepsilon_i <$

1) 则被复用资源的蜂窝用户的中断概率表示为

$$\text{Probability}(\gamma_i^c \leq \beta_i) \leq \varepsilon_i \quad (14)$$

根据系统模型可知,D2D 异构网络中的高斯白噪声功率与同频干扰相比较可忽略不计,因此,结合式(13)和式(14)得

$$\begin{aligned} \text{Probability}(\gamma_i^c \leq \beta_i) &= \text{Probability}\left(\frac{P_i^c G_i}{p_j^D H_j^D + \sigma_0^2} \leq \beta_i\right) \\ &= \text{Probability}(p_j^D H_j^D \geq P_i^c G_i / \beta_i) = \text{Probability}(p_j^D H_j^D \geq T_i) \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $T_i = \frac{P_i^c G_i}{\beta_i}$, 令 $I_j = p_j^D H_j^D$ 则 I_j 的矩母函数为

$$\Phi I_j(S) = \exp\left[-\pi \lambda_j p_j^{\frac{D}{\alpha}} S^{\frac{2}{\alpha}} \Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right)\right] \quad (16)$$

对公式(16)进行拉普拉斯逆变换求解得 I_j 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_j(x) &= \frac{\pi}{2} \lambda_j \sqrt{p_j^D} x^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\pi^3 (\lambda_j \sqrt{p_j^D})^2}{4x}\right) \\ &= \frac{\pi}{2} \lambda_j \sqrt{p_j^D} x^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\pi^3 \lambda_j^2 p_j^D}{4x}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 λ_j 为请求复用资源的 D2D 用户数量,联合式(15)和式(17)可得

$$\begin{aligned} \text{Probability}(\gamma_i^c \leq \beta_i) &= \text{Probability}(I_j \geq T_i) \\ &= \int_{T_i}^{+\infty} f_j(x) dx = \text{erf}\left(\frac{\pi^{\frac{3}{2}} \lambda_j \sqrt{p_j^D}}{2 \sqrt{T_i}}\right) = \pi \lambda_j p_j^D \sqrt{\frac{\beta_i}{P_i^c G_i}} \end{aligned} \quad (18)$$

式中 误差函数 $\text{erf}(x) = \frac{2x}{\sqrt{\pi}}$ 。根据公式(17)知:被复用资源的蜂窝用户的中断概率与 D2D 用户数量、D2D 用户发送

功率和被复用资源的蜂窝用户门限值 β_i 成正比。

3 仿真与性能分析

为了验证本文提出的资源分配算法对系统性能的影响,采用计算机仿真进行仿真分析。仿真场景为一个半径为 500 m 的 LTE 小区,基站位于小区中心,D2D 用户和蜂窝用户均匀的分布在小区内,D2D 用户复用蜂窝用户的上行频谱资源。其余主要仿真参数设置:小区半径为 500 m,D2D 对通信距离为 10 ~ 50 m,蜂窝用户数为 5 个,系统带宽为 5 MHz,基站发送功率为 46 dBm,D2D 发送功率为 24 dBm,路损指数为 4,路损系数为 0.01,噪声功率密度为 -174 dBm/Hz,蜂窝用户的最小 SINR 为 $[0, 25]$ dB 之间均匀分布,D2D 用户的最小 SINR 为 $[0, 25]$ dB 之间均匀分布。

在 D2D 异构网络中,系统吞吐量是一个重要的仿真性能参数。图 2(a) 表示不同算法下系统吞吐量随 D2D 对数增加的变化曲线。从图中可以看出,随着 D2D 对数的增加,系统吞吐量也在不断的增加。同时,与贪婪分组算法 (greed-GA algorithm) 和随机资源分配算法 (Random-RA algorithm) 相比,本文所提算法下的系统吞吐量最优。这是因为与 Greed-GA algorithm 相比较本文所提算法充分考虑并减少了用户之间的同频干扰,与 Random-RA algorithm 相比较本文所提算法不仅考虑了用户之间的同频干扰,而且还实现了多个 D2D 用户复用蜂窝用户频谱资源的场景。此外,当 D2D 对数超过 7 个时,系统吞吐量趋于饱和,这是因为当 D2D 对数过多时用户之间的干扰过大引起的。

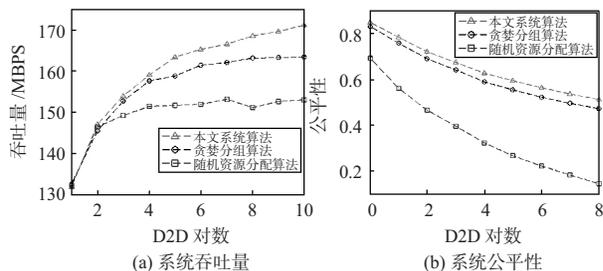


图 2 仿真结果

由公式 (12) 可以看出,D2D 用户的公平性指数越高系统的公平性就越高,且 $0 < Fair_j(n) < 1$ 。图 2(b) 所示为不同算法下公平性随 D2D 对数增加的变化曲线。从图中可以看出,随着 D2D 对数的增加,系统公平性在不断的减小,原因是随着 D2D 对数的增加,用户之间的干扰随之越来越大。此外,本文所提算法下的公平性有较大的提升,因为本文所提算法即考虑了用户之间的干扰问题,还通过中断概率保证了蜂窝用户的通信质量,使得蜂窝用户和 D2D 用户之间的吞吐量差异减小。而其他两种对比算法在最大化系统吞吐量和减小同频干扰问题的过程中牺牲了较大的公平性,因此,本文所提算法下的公平性是最优的。

4 结束语

在蜂窝系统中引入 D2D 通信技术虽然能够提升系统

性能,但引发了严重的同频干扰问题,并降低了系统公平性。针对上述问题,提出了一种新的资源分配算法。先在基站周围设置保护区域,限制 D2D 用户复用蜂窝用户资源进行通信,然后将保护区域外复用同一蜂窝用户资源的 D2D 用户分为一组,最后为每一个 D2D 用户分组选择蜂窝用户资源进行复用。仿真结果显示,本文所提算法在系统吞吐量和系统公平性上具有显著的优势。

参考文献

- [1] LIU J, ZHANG S, KATO N, et al. Device-to-device communications for enhancing quality of experience in software defined multi-tier LTE-A networks [J]. Network IEEE, 2015, 29(4): 46-52.
- [2] SARTORI P, BAGHERI H, DESAI V, et al. Design of a D2D overlay for next generation LTE [C]// Vehicular Technology Conference, IEEE, 2014: 1-5.
- [3] LIU J, KATO N, MA J, et al. Device-to-device communication in LTE-advanced networks: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(4): 1923-1940.
- [4] KAR U N, SANYAL D K. An overview of device-to-device communication in cellular networks [J/OL]. ICT Express, 2018, 4(4): 203-208 [2018-09-01]. https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.08.002
- [5] NARDINI G, STEA G, VIRDIS A. A scalable data-plane architecture for one-to-one device-to-device communications in LTE-Advanced* [J]. Computer Networks, 2018, 131: 77-95.
- [6] SHAH S T, HASAN S F, SEET B C, et al. Device-to-device communications: A contemporary survey [J]. Wireless Personal Communications, 2018, 98(1): 1247-1284.
- [7] 张慧哲, 王坚. 基于初始聚类中心选取的改进 FCM 聚类算法 [J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 206-209.
- [8] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K R. CRAHNS: Cognitive radio Ad Hoc networks [J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 810-836.
- [9] XIA C, XU S, KWAK K S. Resource allocation for device-to-device communication in LTE-A network: A stackelberg game approach [C]// Vehicular Technology Conference, IEEE, 2016: 1-5.
- [10] ZHANG H, SONG L, HAN Z. Radio resource allocation for device-to-device underlay communication using hypergraph theory [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 15(7): 4852-4861.
- [11] ZHAO P, FENG L, YU P, et al. A social-aware resource allocation for 5G device-to-device multicasting communication [J]. IEEE Access, 2017(99): 1.

作者简介

薛建彬(1973-),男,教授,博士,研究领域为无线通信理论与技术。

郭玉晶(1993-),女,硕士研究生,研究方向为无线通信理论与技术, E-mail: 317573513@qq.com。