

基于 D2D 对分组的 TDD 系统资源分配算法

张祖凡^{1,2} 王立沙¹ 陈美铃¹
¹(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)
²(移动通信技术重庆市重点实验室(重庆邮电大学) 重庆 400065)
(zhangzf@cqupt.edu.cn)

Resource Allocation Algorithm Based on D2D Pairs Grouping in TDD System

Zhang Zufan^{1,2}, Wang Lisha¹, and Chen Meiling¹
¹(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)
²(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology (Chongqing University of Posts and Telecommunication), Chongqing 400065)

Abstract Due to multiple D2D users and one cellular user sharing the same downlink channel resources in TDD systems, an algorithm of resource allocation based on grouping for D2D pairs is proposed to maximize the system throughput, which consists of three parts. This algorithm firstly determines the D2D groups number with the system channels number and the user grouping position centre in terms of the distance among the D2D pairs, and divides the remaining D2D pairs into corresponding groups according to its degree of effect on the communication outage probability of users within the same D2D group. Afterwards, by comparing the interference impact of D2D group on the cellular user, the matching algorithm is used to determine and share the corresponding cellular channel resource for D2D group. Finally, according to the different QOS of cellular users and D2D pairs, the D2D pairs with serious interference are deleted and the D2D pairs sharing the cellular channel resource are finally determined. Simulation results show that more D2D pairs can access to the system and the system throughput is improved by the proposed algorithm.

Key words time division duplex (TDD) system; device-to-device (D2D) pair; quality of service; resource allocation; system throughput

摘 要 针对 TDD 系统中多个 D2D 用户复用 一个蜂窝用户下行信道资源,在最大化系统吞吐量的目标下,提出一种 D2D 对分组资源分配算法,该算法由 3 部分组成:1)根据信道数确定 D2D 对分组数,按 D2D 对间距确定分组中心,并将余下 D2D 对按其 对组内 D2D 用户通信中断概率影响程度划分到对应分组;2)通过比较 D2D 对分组与蜂窝用户干 扰影响强度,利用匹配算法为 D2D 对分组寻找相 应蜂窝用户资源并复用;3)进一步根据蜂窝用户 和 D2D 用户 QOS 要求,去掉组内干扰较大 D2D 对,从而得到最终复用蜂窝用户资源的 D2D 对.仿真分析表明:所提出算法既能允许系统接入较多 D2D 对,还能提高系统吞吐量.

收稿日期:2015-12-19;修回日期:2016-06-02
基金项目:国家自然科学基金项目(61440062);国家“八六三”高技术研究发展计划基金项目(2014AA705);长江学者和创新团队发展计划基金 项目(IRT16R72)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61440062), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA705), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT16R72).

关键词 时分双工系统;D2D 对;服务质量;资源分配;系统吞吐量

中图法分类号 TN929.5; TP393

随着移动用户的增长以及用户对移动业务量和质量要求的提高,传统蜂窝移动通信系统中,通过基站转发进行用户间通信的通信方式呈现出一定的局限性.D2D(device-to-device)通信技术能使 2 个距离较近的用户不用通过基站转发而进行直接通信,减轻了基站负载,同时在节省功率和资源、提升传输速率等多方面有着巨大的优势,因而在近年来受到业界广泛的研究^[1-2].鉴于 D2D 通信带来的优势,目前已将 D2D 通信融合到蜂窝系统中形成了混合的异构网络系统^[3-5].伴随着频谱资源越来越稀缺,蜂窝网络没有充分利用频谱资源,而 D2D 通信可以通过复用蜂窝用户频谱资源提高频谱利用率.但复用相同的资源,在蜂窝用户与 D2D 用户间以及 D2D 用户之间会引入同频干扰,甚至使通信中断.实际生活中,下行业务需求远大于上行业务需求,因此,如何合理地给 D2D 用户选择复用的蜂窝下行信道资源对于频谱资源利用率的提高和系统性能的提升具有重要意义.

D2D 用户对蜂窝用户资源的复用主要分为上行资源复用和下行资源复用.针对上、下行资源复用又主要表现为:一个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源、一个 D2D 用户复用多个蜂窝用户资源、多个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源.文献[6]中,研究了一个 D2D 用户只能复用一个蜂窝用户资源的分配方法,但在实际系统中,当蜂窝用户数大于 D2D 对数时,一个 D2D 用户复用多个蜂窝用户资源能够取得更高的频谱利用率.部分研究中允许一个 D2D 用户复用多个蜂窝用户资源的分配方法;但是文献[7]考虑系统中仅有一个 D2D 对;文献[8-9]中的资源分配算法不能保证每个 D2D 用户一定被分配到多个蜂窝用户资源,并且具有较高的计算复杂度;文献[10]为一个 D2D 对引入容量限制区域,从而决定 D2D 用户的候选蜂窝用户集合.考虑到现实生活中,终端用户进行数据或其他资源共享的现象已非常普遍,也就是说存在大量的 D2D 用户,显然一个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源和一个 D2D 用户复用多个蜂窝用户资源在实际中不太适用.而针对多个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源的研究尚且不多,其中优先考虑 D2D 对进行明确分组的研究目前较少.

针对上述问题,本文优先考虑将所有 D2D 对分

组,再为 D2D 分组分配信道资源.首先确定 D2D 对分组数,并确定分组中心;其次将剩余 D2D 对添加到相应 D2D 分组;然后为 D2D 分组找到合适蜂窝用户资源进行复用;最后基于分组内用户 QOS 要求将干扰影响较大的 D2D 对去掉,得到最终资源复用用户.

1 系统模型

考虑在基于时分双工(time division duplex, TDD)模式的单个小区蜂窝系统中引入 D2D 通信.在该模型中,把能够建立直接通信的 2 个用户称为一个 D2D 对,而对应 2 个 D2D 用户分别为 D2D 发送用户和接收用户.考虑系统中有 M 个蜂窝下行用户,记为集合 $C=\{C_1,C_2,\cdots,C_M\}$, N 个 D2D 对,记为集合 $D=\{D_1,D_2,\cdots,D_N\}$,其中, $N>M$,下行频谱资源划分成 M 个正交子信道,并且 M 个子信道通过基站被预先分配给 M 个蜂窝用户,即每个蜂窝用户各自占用一个信道资源.将 D2D 对 D_i 的发送端记为 T_i ,接收端记为 R_i .为了研究方便,这里假设所有蜂窝用户和 D2D 用户在小区内服从均匀分布,同时,为了有效避免 D2D 用户受到基站较强的干扰,在离基站 L (单位 m)以外才允许建立 D2D 通信.

为了充分利用频谱资源,在一定条件下,允许多个 D2D 用户同时与一个蜂窝用户复用相同下行信道资源.将可以复用相同信道资源的所有 D2D 用户对应的 D2D 对看作一个 D2D 分组,将可以复用相同信道资源的蜂窝用户与 D2D 用户对应的 D2D 对看作一个资源复用组,即一个资源复用组由一个蜂窝用户和一个 D2D 分组构成.如图 1 所示, D_1,D_2

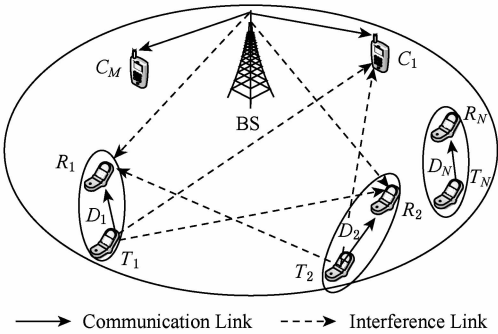


Fig. 1 System model

图 1 系统模型

为一个 D2D 分组,该 D2D 分组与 C_1 形成一个资源复用组.复用相同信道资源的用户间会产生同频干扰,严重时会影响用户正常通信.因此,在信道复用时,需考虑到用户的通信质量要求(这里主要用 SINR 表示用户对通信质量要求).

另外,在该系统中,还假设具备 4 个条件:1)所有终端都具备最基本的蜂窝通信能力;2)当 D2D 发送用户向 D2D 接收用户请求通信时,会先发送导频信号,D2D 接收用户能够根据接收的导频信号估计链路状态信息(channel state information, CSI);3)终端能够预估受到的干扰;4)所有终端利用 GPS 上报位置信息,并把 CSI 等相关信息反馈给基站,基站知道整个系统的链路状况,从而有效进行集中控制分配信道资源.

2 信道资源分配

2.1 中断概率分析

小区中任意 2 个 D2D 对 D_n 和 $D_{n'}$ 使用相同信道资源时, R_n 端的 SINR 可表示为

$$SINR_{T_{n'}-R_n} = \frac{P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha} |h_{T_n-R_n}|^2}{P_{T_{n'}} d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha} |h_{T_{n'}-R_n}|^2 + N_0}, \quad (1)$$

其中, P_{T_n} 表示 T_n 的发送功率, $d_{T_n-R_n}$ 表示 D_n 收发用户间距, α 是路径损失指数,信道噪声 $N_0 = \eta W$, η 为接收端的高斯白噪声功率谱密度, W 为信道带宽, $|h|^2$ 是服从均值为 σ^2 的指数分布,其概率密度函数具体表示为

$$f(|h|^2) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} \exp(-|h|^2/\sigma^2), & |h|^2 > 0, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

为了保证 D2D 用户的通信质量要求,预设 D2D 用户的 SINR 阈值为 γ_1 ,那么当 D_n 受到 $D_{n'}$ 的同频干扰时的中断概率可表示为

$$p_{T_{n'}-R_n}^{\text{out}} = p(SINR_{T_{n'}-R_n} \leq \gamma_1). \quad (3)$$

设 $x = P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha} |h_{T_n-R_n}|^2$, $y = P_{T_{n'}} \times d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha} \times |h_{T_{n'}-R_n}|^2 + N_0$,则结合式(1)(2)(3)可得到:

$$p_{T_{n'}-R_n}^{\text{out}} = p\left(\frac{x}{y} \leq \gamma_1\right) =$$

$$\int_{N_0}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sigma^2 P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha}} \exp(-x/\sigma^2 P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha}) \times \frac{1}{\sigma^2 P_{T_{n'}} d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha}} \exp[-(y-N_0)/\sigma^2 P_{T_{n'}} d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha}] dx dy. \quad (4)$$

令 $a = \sigma^2 P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha}$, $b = \sigma^2 P_{T_{n'}} d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha}$,则式(4)可以进一步转换为

$$\begin{aligned} p_{T_{n'}-R_n}^{\text{out}} &= \int_{N_0}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{a} \exp\left(-\frac{x}{a}\right) \frac{1}{b} \exp\left(-\frac{(y-N_0)}{b}\right) dx dy = \\ &= -\frac{1}{b} \int_{N_0}^{+\infty} \exp\left(-\frac{y\gamma_1}{a} - \frac{y-N_0}{b}\right) dy + \\ &= \frac{1}{b} \int_{N_0}^{+\infty} \exp\left(-\frac{y-N_0}{b}\right) dy = \\ &= 1 - \frac{a \exp(-N_0\gamma_1/a)}{a + b\gamma_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 基于中断概率的 D2D 分组

为了充分利用信道资源,考虑多个 D2D 用户与一个蜂窝用户复用相同信道资源.同时,系统在允许尽可能多的 D2D 对接入前提下,需要进一步提升系统吞吐量.基于以上分析,可建模如下:

$$\max(R_C + R_D) =$$

$$\max\left(\sum_{C_m \in C} W \log(1 + SINR_{C_m}) + \sum_{D_n \in D} W \log(1 + SINR_{R_n})\right), \quad (6)$$

$$\text{s. t. } SINR_{C_m} \geq \gamma_2, \quad (7)$$

$$SINR_{R_n} \geq \gamma_1. \quad (8)$$

式(6)表示系统总的吞吐量,式(7)保证了蜂窝用户的 SINR 要求,式(8)保证了 D2D 用户的 SINR 要求.

D2D 用户复用所有蜂窝用户信道资源相比于仅复用部分蜂窝用户信道资源,系统能够接入更多的 D2D 对,为 D2D 系统带来更大的增益.为了保证所有蜂窝用户信道资源都被利用,在 $N > M$ 时,首先,将 N 个 D2D 对划分为 M 个 D2D 分组,划分结果记为 G , $G = \{G_1, G_2, \dots, G_M\}$;然后,为每个 D2D 分组找到一个合适的蜂窝用户信道资源进行复用,此时该 D2D 分组和复用蜂窝用户形成初始复用组;最后去掉初始复用组内干扰影响较大的 D2D 对,从而形成 M 个复用组. D2D 对分组划分的主要步骤为:1)选取 M 个距离最近的 D2D 对作为 D2D 分组中心;2)根据中断概率影响,将剩余的 D2D 对添加到对应的 D2D 分组.这里假设任意 D2D 对的 2 维平面坐标位置表示为

$$(x_{D_i}, y_{D_i}) = \left(\frac{x_{T_i} + x_{R_i}}{2}, \frac{y_{T_i} + y_{R_i}}{2}\right), \quad (9)$$

其中, x_{T_i}, y_{T_i} 表示对应 D2D 用户坐标位置.

任意 2 个 D2D 对间的距离表示为 d_{ij} ,具体为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{D_i} - x_{D_j})^2 + (y_{D_i} - y_{D_j})^2}. \quad (10)$$

根据 D2D 对的距离,选择距离最近的 M 个 D2D 对作为 M 个 D2D 分组的组中心,具体选择依据为

$$D^* = \min_{D_n, D_{n'} \in D, D_n \text{ 或 } D_{n'} \notin G} d_{m'}. \quad (11)$$

将式(11)进一步阐述为 3 种情形:

1) 当前距离最近的 2 个 D2D 对中,其中有一个 D2D 对已经被选为 D2D 分组中心,则将另一个 D2D 对继续作为下一个 D2D 分组中心.

2) 若 2 个 D2D 对均未被选为 D2D 分组中心,同时未确定分组中心的 D2D 分组数仅为 1,则将这 2 个 D2D 对中与被选 D2D 对距离最近的一个 D2D 对作为下一个 D2D 分组的分组中心.

3) 若 2 个 D2D 对均未被选为 D2D 分组中心,同时未确定分组中心的 D2D 分组数 ≥ 2 ,则将这 2 个 D2D 对均选中作为下 2 个 D2D 分组的分组中心.

因此,式(11)中的 $D^* = \{D_n, D_{n'}\}$, 或 $D^* = \{D_n\}$, 或者 $D^* = \{D_{n'}\}$. 将选中的 D2D 对从未分组 D2D 对集合 D 中去掉. 若 D2D 分组中心确定的个数不足 M ,则继续使用式(11)确定分组中心. 最终选取 M 个 D2D 对作为 M 个 D2D 分组的分组中心,并分别加入到 $G_1, G_2, \dots, G_M$ 中.

在 D2D 分组中心选择完成之后,以 D2D 对收发端间距衡量链路质量,间距越小,损失越小,则链路传输质量越好,表示为

$$D_n'^* = \min(d_{T_1-R_1}, d_{T_2-R_2}, \dots, d_{T_N-R_N}), \quad (12)$$

其中, $D_n'^*$ 表示链路质量最好的 D_n .

为了给每个 D2D 分组继续添加 D2D 对,针对剩余 $(N-M)$ 个 D2D 对,从满足式(12)的链路质量最好的 D_n 开始逐个分析,分别添加到对应 D2D 分组.

计算 D_n 发送用户对当前 D2D 分组 $G_i (i=1, 2, \dots, M)$ 中所有 D2D 接收用户造成的中断概率之和,记为 $p_{D_n-G_i}^{\text{out}}$,表示为

$$p_{D_n-G_i}^{\text{out}} = \sum_{D_{n'} \in G_i} p_{T_n-R_{n'}}^{\text{out}}, \quad (13)$$

$p_{D_n-G_i}^{\text{out}}$ 越小,表明 D_n 中 D2D 发送用户对当前 D2D 分组内 D2D 接收用户干扰和越小,反之越大. 将 D_n 对当前分组造成中断概率最小的分组记为 G^* ,表示为

$$G^* = \min(p_{D_n-G_1}^{\text{out}}, p_{D_n-G_2}^{\text{out}}, \dots, p_{D_n-G_M}^{\text{out}}). \quad (14)$$

根据式(14),将 D_n 加入 G^* ,具体算法描述如算法 1.

算法 1. D2D 分组算法.

初始化: D2D 集合和 D2D 分组标号 $i, D = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}, G = \{G_1, G_2, \dots, G_M\}, \forall i, G_i = \emptyset$.

① 根据前面所述 D2D 分组中心选择方法,选择 M 个 D2D 分组中心分别加入到 G 中 M 个 D2D 分组集合,把已被选择的 D2D 对记为集合 D' ;

② 更新 $D = D/D', N = N - M$;

③ for $j = 0$ to N

④ 从 D 中选择满足式(12)的 D_n ;

⑤ for $i = 1$ to M

⑥ 按式(13)计算 D_n 对 G_i 造成的中断概率和 $p_{D_n-G_i}^{\text{out}}$;

⑦ end for

⑧ 将满足式(14)的 D_n 加入 $G^*, G^* = G^* \cup D_n, D = D \setminus \{D_n\}, N = N - 1$;

⑨ end for

2.3 确定复用蜂窝用户

根据 2.2 节中所述方法将 N 个 D2D 对分为 M 个分组后,再为每个 D2D 分组找到一个最合适的蜂窝用户进行信道资源复用. 为了使复用组内吞吐量更大,在确定 D2D 分组复用蜂窝用户信道资源过程中,主要考虑当前 D2D 分组中所有 D2D 用户对蜂窝用户带来的干扰影响. 将 G_i 对 C_m 的干扰记为 $I_{G_i-C_m}$,具体表示为

$$I_{G_i-C_m} = \sum_{D_n \in G_i} P_{T_n} d_{T_n-C_m}^{-\alpha} |h_{T_n-C_m}|^2. \quad (15)$$

将对 C_m 干扰最小的 D2D 分组记为 G_m^* ,表示为

$$G_m^* = \min(I_{G_1-C_m}, I_{G_2-C_m}, \dots, I_{G_M-C_m}). \quad (16)$$

选择 G_m^* 和 C_m 复用相同信道资源,即将 C_m 加入到 G_m^* ,形成初始复用组,具体如算法 2.

算法 2. D2D 分组与蜂窝用户匹配算法.

初始化: $G = \{G_1, G_2, \dots, G_M\}, C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$.

① for $i = 1$ to M

② if $C_i \notin C$

③ $i = i + 1$

④ continue;

⑤ else

⑥ for $j = 1$ to M

⑦ if $G_j \notin G$

⑧ $j = j + 1$;

⑨ continue;

⑩ else

- ⑪ 按式(15)计算 G 中 G_j 对 C 中 C_i 的干扰大小;
- ⑫ end if
- ⑬ end for
- ⑭ 按式(16)将 G_m^* 和 C_i 分到同一组, 复用相同信道资源; 同时, 更新 $G = G / \{G_m^*\}$, $G_m^* = G_m^* \cup C_i$, $C = C / \{C_i\}$;
- ⑮ end if
- ⑯ end for

2.4 确定最终复用用户

通过匹配算法, 能够将对蜂窝用户干扰最小的 D2D 分组与该蜂窝用户一起形成初始资源复用组. 例如图 1 中 D_1, D_2, C_1 分为一组形成一个初始复用组. 初始复用组内同频干扰有 3 种: 1) 基站对 D2D 接收用户的干扰; 2) D2D 发送用户对其他 D2D 接收用户干扰; 3) D2D 发送用户对蜂窝用户的干扰. 此时, 复用组 G_m 内蜂窝用户 C_m 的 SINR 可表示为

$$SINR_{C_m} = \frac{P_m d_{B-C_m}^{-\alpha} |h_{B-C_m}|^2}{\sum_{D_n \in G_m} P_{T_n} d_{T_n-C_m}^{-\alpha} |h_{T_n-C_m}|^2 + N_0}. \quad (17)$$

复用组 G_m 内 D_n 的 D2D 接收用户 SINR 表示为

$$SINR_{R_n} = \frac{(P_{T_n} d_{T_n-R_n}^{-\alpha} |h_{T_n-R_n}|^2)}{(P_m d_{B-R_n}^{-\alpha} |h_{B-R_n}|^2 + \sum_{D_{n'} \in G_m, D_{n'} \neq D_n} P_{T_{n'}} d_{T_{n'}-R_n}^{-\alpha} |h_{T_{n'}-R_n}|^2 + N_0)}. \quad (18)$$

以式(6)表示的系统吞吐量可以转换为

$$\max \sum_{i=1}^M G_i = \max \sum_{i=1}^M (R_{C_i} + \sum_{D_n \in G_i} R_{D_n}) = \sum_{i=1}^M \max (R_{C_i} + \sum_{D_n \in G_i} R_{D_n}). \quad (19)$$

要满足目标函数, 同时使系统尽可能多地接入 D2D 对, 等价于使得每个初始复用组中尽可能多地接入 D2D 对以及优化复用组速率. 根据式(7)(8), 蜂窝用户 SINR 阈值为 γ_2 , D2D 对接收用户的 SINR 阈值为 γ_1 , 资源分配过程中需满足蜂窝用户以及 D2D 用户的 SINR 阈值要求. 基站根据现有信息预估 D2D 接收用户和蜂窝用户的 SINR. 在该系统中, 蜂窝用户作为主服务用户, 首先确保每个初始复用组内蜂窝用户的 SINR 被满足, 根据式(7)(17)计算初始复用组内蜂窝用户 SINR, 进一步判断是否满足条件. 若蜂窝用户约束条件未满足, 为了接入

更多 D2D 对, 则将初始复用组内对蜂窝用户干扰最大的 D2D 用户对应 D2D 对从该组中删除, 以保证蜂窝用户受到的干扰在一定的范围内, 同时还能忍受的干扰最大. 未被分配到信道资源的 D2D 用户则进入等待队列, 重复该步骤, 直至蜂窝用户满足阈值条件.

然后, 结合式(8), 按 D2D 用户 SINR 从大到小遍历组内所有 D2D 接收用户, 并判断系统是否允许该 D2D 对接入. 如果 $SINR_{R_n} \geq \gamma_1$, 允许接入, 并继续对下一个 D2D 接收用户进行判断; 否则从未被遍历的 D2D 用户中找到对 R_n 干扰最大的 D2D 用户, 将对应 D2D 对从该组内删除, 并让其进入等待队列, 等待下一次分配, 重复该步骤直至组内所有 D2D 用户均满足阈值条件, 从而形成最终的资源复用组. 此时根据式(17)(18)重新计算组内所有用户 SINR, 仿真时通过式(20)~(22)计算系统中蜂窝系统吞吐量 R_C , D2D 系统吞吐量 R_D 和系统总吞吐量 R_T .

蜂窝系统吞吐量 R_C 表示为

$$R_C = \sum_{i=1}^M W(1 + \ln(1 + SINR_{C_i})). \quad (20)$$

D2D 系统吞吐量 R_D 表示为

$$R_D = \sum_{i=1}^M \sum_{D_n \in G_i} R_{D_n} = \sum_{i=1}^M \sum_{D_n \in G_i} W(1 + \ln(1 + SINR_{D_n})). \quad (21)$$

系统总吞吐量 R_T 表示为

$$R_T = R_D + R_C = \sum_{i=1}^M [W(1 + \ln(1 + SINR_{C_i})) + \sum_{D_n \in G_i} W(1 + \ln(1 + SINR_{D_n}))]. \quad (22)$$

3 实验仿真与分析

本节通过系统仿真对本文提出的资源分配算法带来的系统性能进行分析. 为了简化仿真分析, 假设基站对蜂窝用户发送功率在每个信道上都相等, D2D 发送端也以相等功率进行数据发送, 仿真场景为一个半径为 500 m 的圆形区域, 基站位于圆心处, 蜂窝用户服从均匀分布, 分布在以基站为圆心、半径为 200 m 的圆内, D2D 用户服从均匀分布, 分布在离基站 L (单位 m) 以外整个圆内, 其余仿真参数参见表 1. 通过将本文提出的分组算法(GA)与随机资源分配算法(RA)和穷尽搜索算法(ESA)对比, 主要分析系统吞吐量和接入 D2D 对数方面的影响.

Table 1 Parameter Setting of Simulation

表 1 仿真参数设置表

Parameter	Value
Cell Radius/m	500
Short-range Communication Distance/m	10~50
Channel Number	5
System Bandwidth/MHz	5
Number of Cellular Users	5
Transmit Power of Base Station/dBm	46
D2D Transmit Power/dBm	24
Path Loss Index α	3
Gaussian White Noise Density/(dB · Hz ⁻¹)	-174
γ_1, γ_2 /dB	15, 15
σ^2	1
L /m	0
Simulation Times	250

图 2 显示了 D2D 系统吞吐量和系统总吞吐量随着系统中 D2D 请求对数增加的变化. 从图 2 中可以看出,随着 D2D 请求对数增加,D2D 系统吞吐量逐渐增加,系统总吞吐量也逐渐增加,当达到一定值后趋于平稳. 因为用户未达到 SINR 阈值时,随着 D2D 请求对数的增加,接入的 D2D 对数增加,吞吐量增加,同信道的蜂窝用户和 D2D 接收用户受到干扰也逐渐增加,可忍受的干扰减小,当组内用户达到 SINR 阈值时,不允许 D2D 对再接入,此时系统吞吐量也基本不再变化.

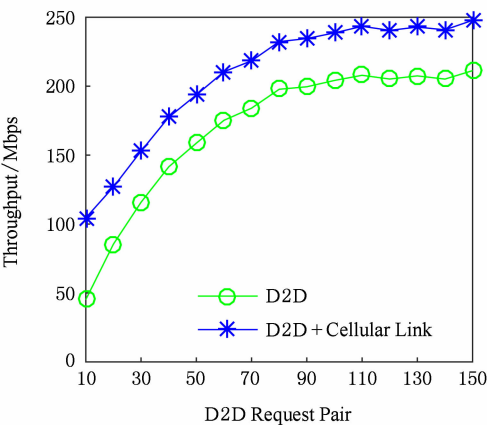


Fig. 2 The impact of different D2D pairs number on throughput

图 2 不同 D2D 对数对吞吐量影响

图 3 比较了随着 D2D 请求对数的增加,不同算法允许接入的 D2D 对数变化. RA 算法没有考虑用

户间的干扰,随机复用信道资源,造成用户间干扰较大,因此在用户 SINR 阈值内可接入的 D2D 对数少. GA 算法在 D2D 对分组时,考虑了 D2D 用户对当前分组中用户的干扰影响,为 D2D 分组寻找合适蜂窝用户资源进行复用,也考虑了 D2D 分组对蜂窝用户的干扰影响,允许接入的 D2D 对较多. ESA 算法每次为蜂窝信道从未分配信道的所有 D2D 用户中选择使系统性能最优的 D2D 用户接入,不能再接入 D2D 用户时才考虑复用下一个蜂窝用户信道资源,使每个蜂窝信道资源都可接入最大 D2D 对数,因此可接入 D2D 数最大.

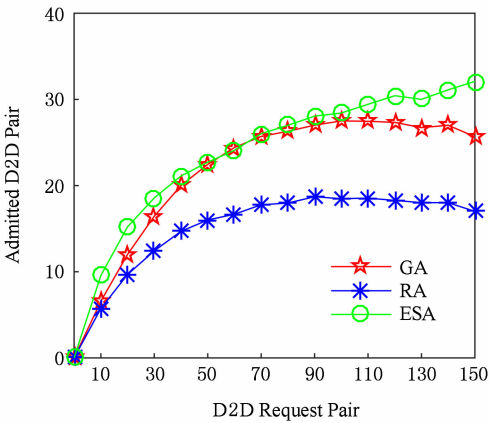


Fig. 3 Comparison of admitted D2D pairs number under different algorithms

图 3 3 种算法允许接入 D2D 数比较

图 4 比较了随着 D2D 请求对数的增加,不同算法 D2D 系统吞吐量变化. RA 算法随机复用,未考虑用户间干扰影响,D2D 系统吞吐量始终最低. 当请求资源的 D2D 对数在一定范围内(小于 110),GA 算法的 D2D 系统吞吐量大于 ESA 算法. 因为

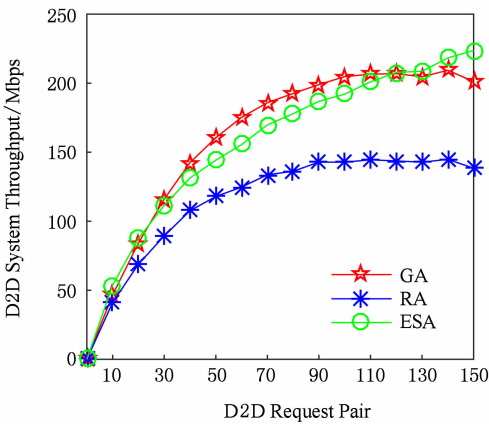


Fig. 4 Comparison of D2D system throughput under different algorithms

图 4 3 种算法 D2D 系统吞吐量比较

GA 算法接入的 D2D 对复用的是所有蜂窝用户信道资源,而 ESA 算法只复用了部分蜂窝用户信道资源.超出该范围,随着 D2D 对数的增加,ESA 算法的 D2D 系统吞吐量大于 GA 算法,因为 ESA 算法还能继续接入 D2D 对,最终允许接入的 D2D 对达到极限,D2D 系统吞吐量也不再增加.

图 5 比较了不同 D2D 用户 SINR 阈值对系统允许接入 D2D 对数带来的影响.从图 5 中可以看出,D2D 接收用户 SINR 阈值越小,允许接入的 D2D 对就越多;反之,SINR 阈值越大,接入 D2D 数越少.当达到一定值后,不再继续增加.因为 SINR 阈值越小,可承受的干扰越大,允许接入的 D2D 对越多.

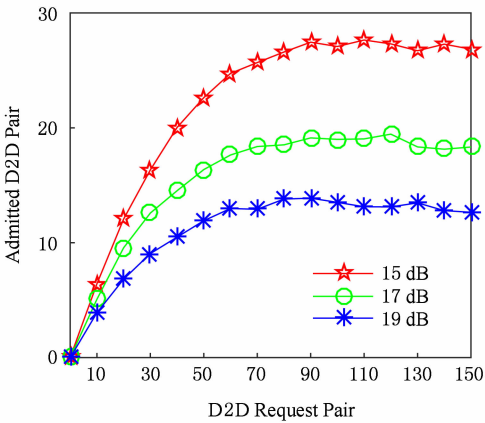


Fig. 5 The impact of different SINR thresholds of D2D users on admitted D2D pairs number
图 5 D2D 用户不同阈值对接入 D2D 数影响

图 6 比较了 D2D 接收用户不同 SINR 阈值对系统吞吐量带来的影响.从图 6 中可以看出,SINR 阈值越小,系统吞吐量越大,反之越小.因为 SINR

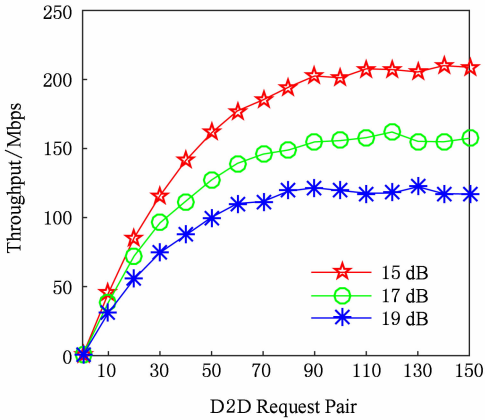


Fig. 6 The impact of different SINR thresholds of D2D users on system throughput
图 6 D2D 用户不同阈值对系统吞吐量影响

阈值越小,通信要求越低,能容忍的干扰越大,接入 D2D 对越多,系统吞吐量越大.

图 7 和图 8 分别比较了 L 的不同取值对系统允许接入 D2D 对数和系统吞吐量带来的影响.由于随着 L 增大,D2D 通信离基站越远,受到的干扰就越小,同时 D2D 用户对蜂窝用户的干扰也越小,因此,允许接入的 D2D 对数越大,系统吞吐量越大.

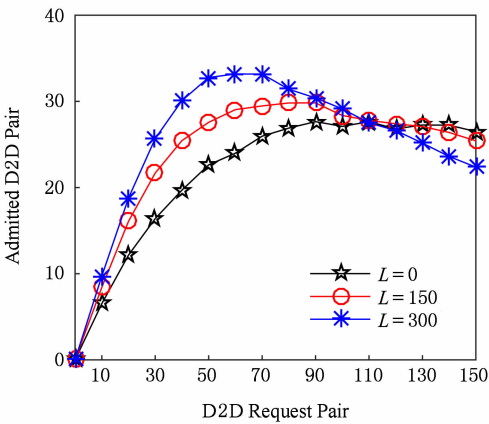


Fig. 7 The impact of different L on D2D pairs number
图 7 不同 L 对接入 D2D 数影响

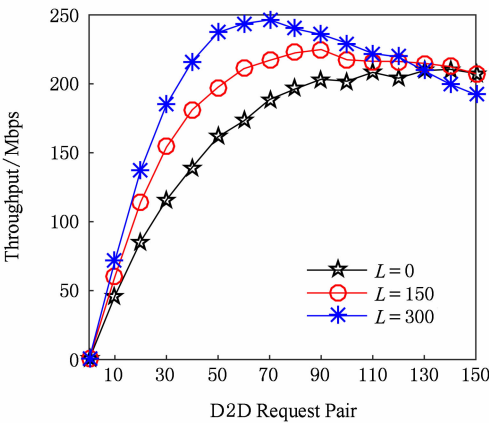


Fig. 8 The impact of different L on system throughput
图 8 不同 L 对系统吞吐量影响

4 结束语

针对小区中 D2D 对数大于蜂窝用户数的情况,优先对 D2D 对分组,再分配信道资源.该算法首先将所有 D2D 对分组,然后考虑 D2D 分组复用其对蜂窝用户干扰影响较小的蜂窝用户信道资源,同时去掉分组内干扰最大 D2D 对直至组内用户均满足 QOS 条件,从而得到能复用相同信道资源的用户.该算法在系统允许接入 D2D 对数和吞吐量方面取得了较好的性能.

参 考 文 献

[1] Hyunkee M, Jemin L, Sungsoo P, et al. Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlaying cellular networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2011, 10(12): 3996-4000

[2] Chia H Y, Tirkkonen O, Doppler K, et al. Power optimization of device-to-device communication underlaying cellular communication [C] //Proc of the 22nd Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009

[3] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49

[4] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 170-177

[5] He Yuan, Zheng Xiaolong. Research on wireless network co-existence at 2.4 GHz [J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(1): 26-37 (in Chinese)
(何源, 郑霄龙. 2.4 GHz 无线网络共存技术研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1): 26-37)

[6] Zhu Daohua, Wang Jiaheng, Swindlehurst A L, et al. Downlink resource reuse for device-to-device communications underlaying cellular networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(5): 531-534

[7] Wang Bin, Chen Li, Chen Xiaohang, et al. Resource allocation optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks [C] //Proc of the 73rd Vehicular Technology Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2011

[8] Wang Feiran, Xu Chen, Song Lingyang, et al. Energy-aware resource allocation for device-to-device underlay communication

[C] //Proc of the 26th Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 6076-6080

[9] Xu Chen, Song Lingyang, Han Zhu, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction [C] //Proc of the 25th Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 445-449

[10] Cai Xuejia, Zheng Jun, Zhang Yuan, et al. A capacity oriented resource allocation algorithm for device-to-device communication in mobile cellular networks [C] //Proc of the 27th Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 2233-2238



Zhang Zufan, born in 1972. PhD, professor and PhD supervisor. His main research interests include massive MIMO and mobile social network.



Wang Lisha, born in 1993. Master candidate. Her main research interests include D2D communication and mobile social network.



Chen Meiling, born in 1989. Master. Her main research interests include D2D communication and wireless resource management.