

联合功率控制的 D2D 资源分配算法

薛建彬^{1,2}, 陈谱滢¹

(1. 兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州 730050; 2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

摘要: 针对 D2D 通信引入 LTE 网络中同频干扰以及能耗过大问题, 首先基于模糊聚类算法, 将 D2D 用户分成若干个 D2D 用户组, 并且基于中断概率最小为每个 D2D 用户组寻找最优蜂窝用户资源, 以降低用户间干扰、提高系统吞吐量。其次结合上述资源分配提出了一种有效的功率控制方案, 调节资源分配后用户组内 D2D 用户的发送功率, 以提高系统能量效率。仿真结果表明: 该算法降低了系统干扰, 提高了系统吞吐量以及系统能量效率, 同时又保证了 D2D 用户获得无线资源的公平性。

关键词: D2D 通信; 模糊聚类; 资源分配; 功率控制; 能量效率

中图分类号: TN 929.5

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)12-1833-08

doi: 10.11936/bjtxb2016050058

Resource Allocation Algorithm Joint Power Control for Device-to-Device Communication

XUE Jianbin^{1,2}, CHEN Puyan²

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

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

Abstract: To solve the problem of co-channel interference and excessive energy consumption when D2D communication was used to LTE network, an algorithm of joint power control and resource allocation was proposed in this research. Firstly, in order to reduce the interference between the users and improve the system throughput, a resource allocation algorithm was proposed based on fuzzy clustering, D2D users were divided into several D2D user groups based on minimum outage probability to research optimal cellular user resource for each D2D user group. Secondly, an effective power control scheme was proposed to regulate the transmission power of D2D users in the D2D user group, which improved the energy efficiency of the system. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce the system interference, improve the system throughput and system energy efficiency, and ensure the fairness of D2D users to access the radio resources.

Key words: D2D communication; fuzzy clustering; resource allocation; power control; energy efficiency

D2D(device-to-device) 通信技术可以使蜂窝系统中移动终端之间不通过基站转发而直接进行数据

传输, 能够提高数据传输速率, 减少系统延时以及小区拥塞^[1-3]。其中, D2D 用户一般通过非正交复用蜂

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 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); 甘肃省自然科学基金资助项目(1310RJZA003)

作者简介: 薛建彬(1973—), 男, 教授, 主要从事无线通信理论与技术方面的研究, E-mail: 317124704@qq.com

通信作者: 陈谱滢(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线通信理论与技术方面的研究, E-mail: cpychen@126.com

蜂窝用户的无线频谱资源实现短距离通信,因此将 D2D 通信引入 LTE 系统中,可以大幅提高无线频谱资源利用率、系统能量效率以及系统吞吐量^[4-5].

然而,由于 D2D 用户非正交复用蜂窝用户的无线资源势必与蜂窝用户之间产生同频干扰,当干扰严重时甚至会造成蜂窝用户通信中断.因此,如何有效抑制同频干扰成为确保 D2D 用户之间进行高质量直通通通信的关键^[6].此外,由于大量用户利用 D2D 通信进行多媒体数据业务,因此对移动终端的节能也提出了新的需求.

当前大量研究表明,一个好的资源分配方案可以提高频谱资源利用率、降低同频干扰;而通过对 D2D 用户的发射功率进行适当控制可以有效地降低能耗,提高电池寿命^[7].

文献[8]研究了多个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源,但是该算法是假设系统中仅存在一个蜂窝用户的场景.文献[9]将距离较近的 D2D 用户分为一个 D2D 用户组,再为每个 D2D 用户组寻找可复用的蜂窝用户资源.但是该算法仅考虑了用户的位置信息,而实际中 D2D 用户具有多个属性.文献[10-11]同样是允许多个 D2D 用户复用一个蜂窝用户资源,但是这 2 种算法为了极大地提高系统吞吐量而严重牺牲了系统公平性,会造成许多 D2D 用户无法忍受等待时延而放弃通信请求.文献[12]中作者联合资源分配与功率控制,先为每个 D2D 用户寻找到可复用的蜂窝用户资源,再调节用户发射功率,使得 D2D 用户采用不低于门限值的最小发送功率.虽然可以降低能耗,可是发射功率过低会使数据传输速率受到很大限制,且通信中断概率也会大幅提高.

为了解决以上问题,本文提出了联合功率控制的资源分配算法.首先,基于模糊聚类分组算法将 D2D 用户分为若干个 D2D 用户组,并为每个 D2D 用户组寻找到最优蜂窝用户资源,以提高系统吞吐量、降低同频干扰.其次,基于博弈论思想提出 D2D 用户功率控制方案,调节 D2D 用户组内的每个 D2D 用户的发送功率以提升能量效率.最后,结合仿真结果,分析该算法相比于其他算法的优势.

1 系统模型

为了提高 LTE 网络中上行链路资源的利用率,本文选择复用系统中蜂窝用户上行链路频谱资源.此外,相比以往一个蜂窝用户上行链路资源仅允许一个 D2D 用户对进行复用,本文按照一定条件将

若干个 D2D 用户对分为一个 D2D 用户组,再为 D2D 用户组寻找最优蜂窝用户上行资源,使得一个 D2D 用户组内的所有 D2D 用户对复用同一蜂窝用户上行链路资源,即实现了多个 D2D 对复用单一蜂窝用户上行链路资源,从而大幅提高了频谱资源利用率.

如图 1 所示,假设单小区内共有 K 个蜂窝用户和 N 个 D2D 用户对并分别记为集合 $C = \{C^j | j = 1, 2, \dots, K\}$, $D = \{D^i | i = 1, 2, \dots, N\}$,其中 $\sqrt{N} < K < N$; D2D 对的发送端记为 T_x ,接收端记为 R_x .同时基站(eNodeB)位于小区中心,蜂窝用户和 D2D 用户在小区内均匀分布.

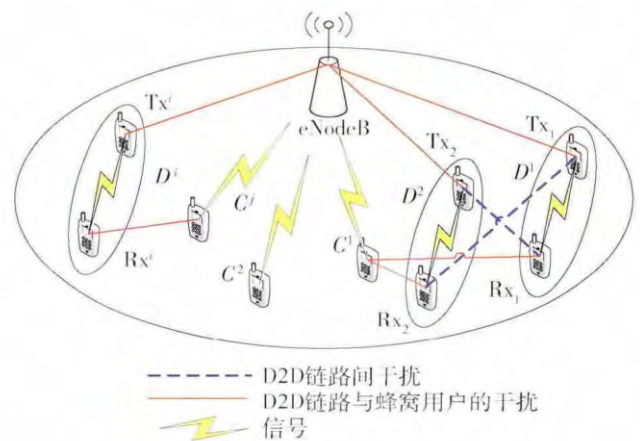


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

基于以上模型,若蜂窝用户 C^l 的上行链路资源未被 D2D 用户复用,则基站端的 SINR 为

$$\gamma_{l,b} = \frac{P_c |h_{c2b}|^2 d_{c2b}^{-\alpha}}{N_0} \quad (1)$$

当蜂窝用户 C^l 的上行链路资源被多个 D2D 用户对复用时,不仅蜂窝用户与 D2D 用户之间存在干扰, D2D 用户之间同样存在干扰.此时,将共同复用蜂窝用户 C^l 上行链路资源的 D2D 用户对称为一个 D2D 用户组,并且表示为: $G_i = \{D^j | j \in 1, 2, 3, \dots, N\}$ ($1 \leq i \leq K$),那么基站端的 SINR 为

$$\gamma_{l,b} = \frac{P_c |h_{c2b}|^2 d_{c2b}^{-\alpha}}{\sum_{D^j \in G_i} P_D |h_{d2b}|^2 d_{d2b}^{-\alpha} + N_0} \quad (2)$$

D2D 用户对的接收端 R_{x_j} 收到的 SINR 为

$$\gamma_{l,d} = \frac{P_D |h_{Tx2Rx}|^2 d_{Tx2Rx}^{-\alpha}}{\sum_{D^j \in G_i - D^i} P_D |h_{d2d}|^2 d_{d2d}^{-\alpha} + P_c |h_{c2d}|^2 d_{c2d}^{-\alpha} + N_0} \quad (3)$$

式中: P_c 和 P_D 分别为蜂窝用户和 D2D 用户对发送

端的发射速率; d_{c2b} 、 d_{c2d} 、 d_{d2d} 、 d_{d2b} 、 d_{Tx2Rx} 分别为蜂窝用户到基站的距离、蜂窝用户到 D2D 对 Rx 的距离、不同 D2D 链路之间的距离、D2D 对到基站的距离、D2D 对 Tx 到 Rx 之间的距离; h_{c2b} 、 h_{c2d} 、 h_{d2d} 、 h_{d2b} 、 h_{Tx2Rx} 分别为蜂窝用户到基站的信道衰落系数、蜂窝用户到 D2D 对 Rx 的信道衰落系数、不同 D2D 链路之间的信道衰落系数、D2D 用户对 Tx 到基站的信道衰落系数、D2D 用户对 Tx 到 Rx 的信道衰落系数; θ 为路损因子; N_0 是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。

在引入 D2D 通信后, 系统的吞吐量增益为

$$\Delta R = \sum_{i=1}^K [\text{lb}(1 + \kappa\gamma_{i,b})] + \sum_{i=1}^M [\text{lb}(1 + \kappa\gamma_{i,d})] - \sum_{i=1}^K [\text{lb}(1 + \kappa\gamma'_{i,b})] \quad (4)$$

其中

$$\kappa = \frac{1.5}{\ln(0.2/\text{BER}_{\text{tar}})} \quad (5)$$

式中: ΔR 为系统吞吐量增益; BER_{tar} 为目标误比特率。由此可以得出, 若 D2D 通信系统中的干扰得到有效抑制, 系统的吞吐量会显著提高。

另外, D2D 通信作为辅助通信方式引入 LTE 蜂窝系统中。因此, 系统中蜂窝用户是主用户而 D2D 用户是从用户。为了保证主用户蜂窝用户的正常通信, 需要满足

$$\text{s. t. } \gamma_{l,b} \geq \gamma_1 \quad (6)$$

$$\gamma_{l,d} \geq \gamma_2 \quad (7)$$

式中 γ_1 、 γ_2 为预设的阈值。

2 信道资源分配

信道资源分配的核心思想是对系统内的 D2D 用户进行有效的分组, 并以分组为单位进行资源复用。首先, 与现有研究的分组方式不同, 本文基于模糊聚类算法对 D2D 用户分组, 将属性相异性较大的用户分为一组, 以降低用户组内 D2D 用户之间的干扰, 充分利用频谱资源。其次, 以最小化中断概率为目标, 为 D2D 用户组分配最优的蜂窝用户上行链路资源。

2.1 D2D 用户分组

基于模糊聚类算法将 N 个 D2D 用户对分为 C 个 D2D 用户组, 记为 $G_i (i = 1, 2, \dots, C)$ 。每个用户组内 D2D 用户的属性应该具有较大的相异性。为

了接近实际情况, 所考虑的 D2D 用户属性集合为 { 用户位置, 待发送数据, 速率要求, 误码率要求, SINR 要求, 最大容忍等待时延 }, 即考察 D2D 用户的 $M (M = 6)$ 个属性。用矩阵 X 表示出所有的 D2D 用户属性, 即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & \cdots & x_{NM} \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (8)$$

式中: $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ \cdots \ X_N]^T$, $X_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{iM}]$ 。 X_i 是矩阵中的第 i 行, 代表第 i 个 D2D 用户的 6 个属性, x_{ij} 代表第 i 个 D2D 用户的第 j 个属性。

理论分析表明, 若小区内 2 个 D2D 用户距离较远, 并且其中一个 D2D 用户对信道资源要求较高, 而另一个 D2D 用户对信道资源要求较低, 那么将这 2 个 D2D 用户分为 1 组让其共同复用 1 个蜂窝用户资源, 所产生的干扰较小, 被复用蜂窝用户的资源也能得到充分利用。因此, 本文基于模糊聚类算法将属性相异性较大的用户分为 1 组, 以降低组内用户之间的干扰, 增加系统吞吐量。在分组时还应该满足以下 2 个条件: 1) 每个 D2D 用户组内至少含有 1 个 D2D 用户; 2) 每个 D2D 用户只能属于 1 个 D2D 用户组。

设定 D2D 用户组之间最小距离阈值为 ε , 定义任意 2 个 D2D 用户间距离为

$$(d_{ij})^2 = \|X_i - X_j\|^2 = (X_i - X_j)^T (X_i - X_j) \quad (9)$$

引入隶属函数 $u_{ik} = u_{G_i}(X_k)$ 来表示对象 X_k 对用户组 G_i 的隶属程度, $u_{ik} \in [0, 1]$, u_{ik} 越大表明对象 X_k 属于用户组 G_i 的程度越大, 离 G_i 的聚类中心越近。具体定义为

$$u_{ik} = \frac{d_{ik}^2}{\sum_{l=1}^c d_{lk}^2} \quad (10)$$

即 u_{ik} 表示 X_k 对 G_i 组的隶属度与除 G_i 外所有用户组隶属度之和的比值。

为避免产生平凡解, 每个对象与聚类中心的距离用其隶属度的平方加权, 从而得到加权误差平方和的目标函数

$$J_m(U, P) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C \frac{1}{(u_{ik})^m (d_{ik})^2}, \quad m \in [1, \infty) \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^C u_{ik} = 1 \quad (12)$$

式中: $U = [u_{ik}]_{C \times N}$; $P = [p_i | i = 1, 2, \dots, C]$ 表示聚类

中心; m 是模糊因子, 决定聚类结果模糊度的权重指数.

根据文献 [13] 模糊聚类算法就是一个使目标函数 $J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P})$ 最小化的迭代求解过程. 因此

$$\min\{J(\mathbf{U}, \mathbf{P})\} = \min \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C (u_{ik})^{-m} (d_{ik})^{-2} \right\} = \sum_{k=1}^N \min \left\{ \sum_{i=1}^C (u_{ik})^{-m} (d_{ik})^{-2} \right\} \quad (13)$$

式(13)极值在约束条件 $\sum_{i=1}^C u_{ik} = 1$ 下, 用拉格朗日乘法求解

$$F = \sum_{i=1}^C (u_{ik})^{-m} (d_{ik})^{-2} + \lambda \left(\sum_{i=1}^C u_{ik} - 1 \right) \quad (14)$$

可以推出使得 $J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P})$ 为最小的 u_{ik} 以及得到 $J_m(\mathbf{U}, \mathbf{P})$ 为最小值时的 p_i 分别为

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^C \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{\frac{2}{m+1}}} \quad (15)$$

$$p_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^C (u_{ik})^{-m} (d_{ik})^{-3}} \sum_{i=1}^C (u_{ik})^{-m} (d_{ik})^{-3} \mathbf{X}_K \quad (16)$$

但是由于以上的模糊聚类分组理论推导中同一 D2D 用户对隶属于所有分组的隶属度之和为 1, 这使得聚类结果对野值比较敏感. 另外, Tan 等在文献 [14] 提出的分层方法 (hierarchical approach, HA), 主要通过分开与整合技术来获得 FCM 算法初始化条件. 实验结果表明: HA 通过优化聚类数目与聚类中心克服了常规模糊 C 均值聚类 (fuzzy C -means, FCM) 算法对野值的敏感性. 因此本文在进行模糊分组时则直接引用了文献 [14] 中的 HA 来确定初始聚类数目和聚类中心以达到有效剔除聚类分组中的野值. 同时根据文献 [15] 所提出聚类分组数的最大值与研究对象之间的关系, 即

$$C \leq C_{\max} \quad (C_{\max} = \sqrt{N}) \quad (17)$$

基于以上分析, 将 N 个 D2D 用户分为 C 个 D2D 用户组的流程如图 2 所示.

由最终输出的聚类中心数来确定分组数 C , 并且根据归属度矩阵来确定每个用户所隶属的用户组, 得出最终的分组结果. 由于该聚类分组算法在确定初始化条件时候考虑到了野值的敏感性, 而不

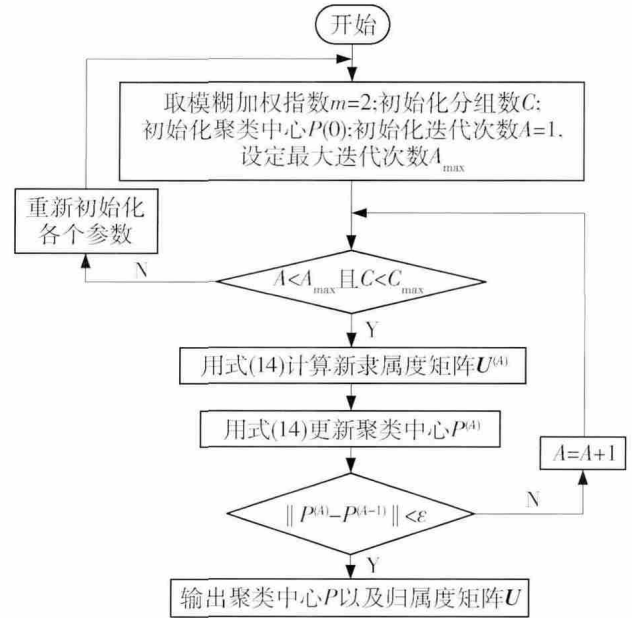


图 2 D2D 用户分组流程

Fig. 2 Flow chart of D2D users grouping

需要通过多次迭代分组去减小野值的影响提高分组的有效性. 因此, 相比于传统 FCM 算法在实时性上几乎没有任何差别. 同时依靠于 4G 基站强大的处理运算能力, 在实际网络部署中能够及时对区域内的 D2D 用户对进行及时的分组, 因此该聚类分组算法具有较强的实用价值.

2.2 选择最优蜂窝用户资源

D2D 用户组复用蜂窝用户资源将会对蜂窝用户造成一定程度的干扰, 甚至导致蜂窝用户通信中断. 基于蜂窝用户中断概率最小原则选择最优资源是指一个 D2D 用户组复用某一特定蜂窝用户资源, 相比于复用其他蜂窝用户的无线资源而言, 给该蜂窝用户造成的中断概率最小. 即该蜂窝用户的上行链路可以较好地容纳此 D2D 用户组, 允许其复用资源进行通信.

由式(2)可知, 当蜂窝用户 C^l 上行链路资源被用户组 G_i 复用, 所受到的信干噪比为 $\gamma_{b,l}$, 因此蜂窝用户中断概率为

$$P_{\text{out}} = P(\gamma_{b,l} \leq \gamma_1) = \int_0^{\gamma_1} f_{\gamma_{b,l}}(\gamma_{b,l}) d\gamma_{b,l} = F_{\gamma_{b,l}}(\gamma_{b,l}) \quad (18)$$

式中: P_{out} 为中断概率; γ_1 为设定的 SINR 门限值; $f_{\gamma_{b,l}}(\gamma_{b,l})$ 为 $\gamma_{b,l}$ 的概率密度函数; $F_{\gamma_{b,l}}(\gamma_{b,l})$ 为 $\gamma_{b,l}$ 的累计分布函数.

同样, 根据式(2), 蜂窝用户 C^l 所在的无线资源 l 上基站受到的 SINR 为

$$\gamma_{b,l} = \frac{P_C |h_{c2b}|^2 d_{c2b}^{-\alpha}}{\sum_{D^l \in G_i} P_D |h_{d2b}|^2 d_{d2b}^{-\alpha} + N_0} = \frac{|h_{c2b}|^2}{\sum_{D^l \in G_i} |h_{d2b}|^2 I + 1/Q} \quad (19)$$

其中: $I = P_D h_{c2b}^\alpha / P_C d_{c2b}^\alpha$, $Q = P_C / N_0 d_{c2b}^\alpha$; 令 $x = |h_{c2b}|^2$, $\kappa = \sum_{D^l \in G_i} |h_{d2b}|^2 I + 1/Q$, 则 $\gamma_{b,l} = x/y$. 由文献[16]引理(4-1)可知蜂窝用户 C^l 的中断概率为

$$P_{out}^{G_i, C^l} = 1 - \frac{1}{1 + \sum_{D^l \in G_i} I \gamma_1} \exp\left(-\frac{\gamma_1}{Q}\right) \quad (20)$$

其中 $P_{out}^{G_i, C^l}$ 越小代表用户组 G_i 中所有 D2D 用户复用蜂窝用户 C^l 的上行链路资源时, 对该蜂窝用户造成的干扰越小. 若

$$P_{out}^{G_i, C^l} = \min P_{out} = \min \{P_{out}^{G_i, C^1}, P_{out}^{G_i, C^2}, \dots, P_{out}^{G_i, C^K}\} \quad (21)$$

则将蜂窝用户 C^l 的上行链路资源分配给用户组 G_i , 即 G_i 中所有 D2D 用户共同复用 C^l 的上行链路资源. 式中 P_{out} 为 G_i 复用所有蜂窝用户的中断概率集合.

3 用户功率控制

资源分配完成之后, 每个 D2D 用户组均基于中断概率最小原则寻找到了最优蜂窝用户资源. 但是, 每个 D2D 用户组内的 D2D 用户均是采用固定的发送功率, 这样不仅能量效率低, 且用户组内 D2D 用户之间的干扰也无法进一步协调. 为了解决以上问题, 提出一种基于博弈论思想的用户功率控制方案, 调整用户组内 D2D 用户的发送功率, 以降低用户组内 D2D 用户间干扰、提高能量效率.

3.1 能量效率分析

若蜂窝用户 C^l 的上行链路频谱资源被 D2D 用户组 G_i 复用, G_i 中 D2D 用户的初始发送功率为 P_D , 则该无线资源上系统所获得的速率 $r_l(G_i, C^l)$ 为

$$r_l(G_i, C^l) = \text{lb} \left(1 + \kappa \frac{P_C |h_{c2b}|^2 d_{c2b}^{-\alpha}}{\sum_{D^l \in G_i} P_D |h_{d2b}|^2 d_{d2b}^{-\alpha} + N_0} \right) + \sum_{D^l \in G_i} \text{lb} \left(1 + \frac{\kappa P_D |h_{T2Rx}|^2 d_{T2Rx}^{-\alpha}}{\sum_{D^m \in G_i - D^l} P_D |h_{d2d}|^2 d_{d2d}^{-\alpha} + P_C |h_{c2d}|^2 d_{c2d}^{-\alpha} + N_0} \right) \quad (22)$$

相应的蜂窝用户 C^l 和 G_i 中所有 D2D 用户在该无线资源上所消耗的功率 $P_l(G_i, P_D)$ 为

$$P_l(G_i, C^l) = P_{tc} + \sum_{D^l \in G_i} P_{td} =$$

$$(P_C + P_{cir}) + \sum_{D^l \in G_i} (P_D + 2P_{cir}) \quad (23)$$

式中: P_{tc} 是蜂窝用户消耗的总功率; P_{td} 是 D2D 用户消耗的总功率. P_{cir} 是电路消耗功率. 那么在该无线资源上的能量效率 $\eta_l(G_i, C^l)$ 为

$$\eta_l(G_i, C^l) = \frac{r_l(G_i, C^l)}{P_l(G_i, C^l)} \quad (24)$$

另外, 若蜂窝用户 C^l 的无线资源未被任何 D2D 用户组复用, 则该无线资源上的能量效率为

$$\eta_l(\emptyset, C^l) = \frac{\text{lb} \left(1 + \kappa \frac{P_C |h_{c2b}|^2 d_{c2b}^{-\alpha}}{N_0} \right)}{P_C + P_{cir}} \quad (25)$$

基于以上分析, 定义蜂窝用户 C^l 所占有的无线资源 l 上的收益 v_l 为

$$v_l = \begin{cases} 0; & \eta_l(G_i, C^l) - \eta_l(\emptyset, C^l) \leq 0 \\ \eta_l(G_i, C^l) - \eta_l(\emptyset, C^l); & \eta_l(G_i, C^l) - \eta_l(\emptyset, C^l) > 0 \end{cases} \quad (26)$$

由式(26)定义可知, 若蜂窝用户 C^l 的无线资源被用户组 G_i 复用后, 使得该无线资源上的能量效率反而下降, 则记为 0 收益, 认为没有给系统带来正收益. 反之, 若 G_i 复用 C^l 的资源后, 使得该无线资源上的能量效率提高, 则给系统带来正收益, 其收益便是复用前后能量效率的差值. 由此可知, 该功率控制的主要目的是提高能量效率.

3.2 效用函数

由式(20)可得蜂窝用户 C^l 成功通信的概率 $P_{success}^{G_i, C^l}$ 为

$$P_{success}^{G_i, C^l} = 1 - P_{out}^{G_i, C^l} \quad (27)$$

通过降低 G_i 组内 D2D 用户的发送功率可以一定程度上降低用户能耗, 但是, 也会导致数据传输速率降低, 能量效率未必会提高. 若提高发送功率则可能导致蜂窝用户的终端概率大幅升高, 因此需要在考虑各种因素后, 取一个均衡各方面的发送功率. 此处, 将蜂窝用户成功通信的概率作为代价函数, 那么, 对于整个 D2D 通信系统而言, 就会有一个效用函数为

$$U_l(G_i, C^l) = v_l - P_{success}^{G_i, C^l} \quad (28)$$

此外, 为了更好地评价系统性能, 这里定义系统满意度 Q 为

$$Q = \frac{N'}{N} \quad (29)$$

式中: N 为当前系统中收到信道资源请求的用户总

数; N' 为当前已被服务的信道资源请求用户中, 速率满足用户要求的数量.

基于以上分析, 在对用户进行分组后, 联合功率控制的资源分配流程如下:

Begin

- 1) 初始化: D2D 用户组集合 $G = \{G_i | i = 1, 2, \dots, C\}$ 、蜂窝用户集合 $C = \{C^j | j = 1, 2, \dots, K\}$ 以及中断概率集合 $P_{out} = \{p_{out}^{G_i, C^1}, p_{out}^{G_i, C^2}, \dots, p_{out}^{G_i, C^K}\}$;
 - 2) for $i = 1$ to C
 - 3) for $j = 1$ to k
 - 4) if $C^j \notin C$
 - 5) $j = j + 1$
 - 6) continue
 - 7) else
 - 8) 用式(14)计算 G_i 对 C^j 的中率;
 - 9) end if
 - 10) 更新中断概率集合;
 - 11) 用式(14)将中断概率最小 C^m 的资源分配给用户组 G_i
 - 12) end for
 - 13) 用式(28)最大化效用函数求解 D2D 用户的发送功率;
 - 14) $C = C - \{C^m\}$;
 - 15) $i = i + 1$
 - 16) end for
- end

根据该算法处理流程, 现将本文提出的联合功率控制模糊聚类资源分配算法 (fuzzy C -means resource allocation algorithm with power control, FCM-PC) 进行复杂度分析. FCM-PC 主要由两部分组成, 即 D2D 的聚类分组和组内用户间的功率控制. 根据算法流程可以得出 FCM-PC 的复杂度主要取决于 D2D 的用户聚类分组. 分组算法中基本的运算操作包括加法、乘法、除法和比较. 最坏的情况下分组迭代更新聚类中心和归属度矩阵的次数为 C 次, 那么该部分中加法运算次数为 $2NC + C^2$, 乘法运算次数为 $2C^2 + 3NC$, 除法运算次数为 $2C$, 比较运算次数为 C 次. 鉴于基站端强大的运算能力, 当系统内 D2D 用户在建立通信链路时基站会进行以上计算并及时为 D2D 用户分配资源. 因此该算法基站端进行集中调度不会引起用户对 D2D 通信链路建立延时的感知.

4 仿真与性能分析

通过计算机仿真对所提算法进行性能验证和分

析. 同时选择半径为 300 m 的 LTE 小区作为场景, 其余仿真参数见表 1. 将本文所提出的联合功率控制的资源分配算法 (FCM-PC) 对比另外 3 种算法: 仅采用本文提出的改进型模糊聚类资源分配而无功率控制的算法 (fuzzy C -means resource allocation without power control, FCM-NPC)、随机资源分配且无功率控制的算法 (random resource allocation algorithm without power control, RDM-NPC) 以及文献 [17] 中传统模糊聚类资源分配且无功率控制的算法 (traditional fuzzy C -means resource allocation algorithm without power control, TFCM-NPC), 重点对比分析了每种算法的系统吞吐量、系统满意度及系统能量效率.

表 1 仿真参数设置表

Table 1 Simulation parameters set

参数名	参数取值
小区半径/m	300
D2D 用户最大距离/m	20
系统带宽/MHz	10
蜂窝用户数/个	10
基站发送功率/dBm	46
蜂窝用户发送功率/dBm	21
D2D 最大发送功率/dBm	21
高斯白噪声密度/(dB·Hz ⁻¹)	-174
路损指数	3
仿真次数	300

图 3 比较了不同算法下的系统吞吐量, 从图 3 可以看出, 吞吐量由大到小是 FCM-PC—FCM-NPC—TFCM-NPC—RDM-NPC. 传统的 TFCM-NPC 仅根据用户的地理位置进行分组, 并且是将距离较近的用户分为一组, 导致组内用户间干扰较大. 此外, 传统算法随机选取聚类中心, 没有解决分组野值问题, 也没有对分组后用户的发送功率进行控制, 其吞吐量较低. 本文所提的 FCM-PC 以及 FCM-NPC, 更多兼顾了待发送数据量、速率要求等方面, 将属性相异性较大的用户分为一组, 有效降低了用户组内 D2D 用户间的干扰及 D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰, 系统提高了吞吐量. 而 FCM-PC 在分配资源后对用户的发送功率进行了控制, 使得数据传输速率得到一定程度提高, 所以有功率控制的 FCM-PC 下的吞吐量要稍高于 FCM-NPC. RDM-NPC 随机算

法没有采用模糊聚类算法对干扰进行有效抑制且没有进行功率控制,其吞吐量最低.

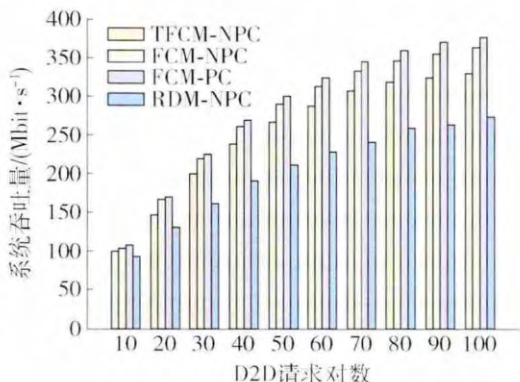


图 3 系统吞吐量比较

Fig. 3 Comparison of system throughputs

图 4 在不同 D2D 用户数时对比了 4 种算法的系统满意度, 4 种算法的系统满意度均随着系统内 D2D 用户对数的增加而降低, 而 FCM-PC 的满意度最高. 每个信道资源复用的 D2D 用户越多, 用户间干扰越大, SINR 也随之降低, 系统满意度呈下降趋势. FCM-PC 在资源分配时考虑了用户的 SINR 要求, 使得同一个 D2D 用户组内用户的 SINR 要求差异性比较大, 即 2 个 SINR 要求较大的用户不会分到同一组, 从而降低了同频干扰, 此外, 功率控制部分以成功通信的概率作为代价函数, 也一定程度上降低了干扰.

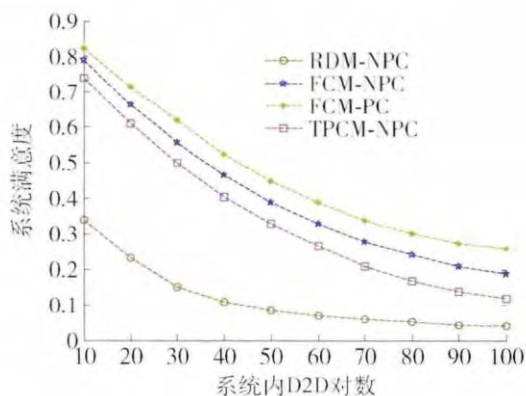


图 4 系统满意度比较

Fig. 4 System satisfaction comparison

相比于 FCM-PC, FCM-NPC 没有功率控制部分, 因此在用户不断增加的情况下, D2D 用户的发送功率难以得到有效控制, 与蜂窝用户的干扰会有功率控制时大, 其系统满意度要低于 FCM-PC. 传统 TFCM-NPC 没有功率控制部分, 且组内同频干扰较大, 系统满意度较低. 但是传统算法中对每个组内

D2D 用户数量进行了限制, 因此已经得到信道资源的 D2D 用户的数据传输速率得到一定保证. RDM-NPC 在资源分配时没有考虑 SINR 要求、最大容忍等待时延等方面, 系统满意度较低.

图 5 比较了 4 种算法下系统能量效率, 在 LTE 系统中引入 D2D 通信之后, 虽然通过资源复用能够提高系统速率, 但是随着 D2D 用户数的增加系统用户所消耗的总功率也会大幅增加, 因此会出现随着 D2D 用户数增加系统能量效率反而降低的现象. 不过, 当对 D2D 用户发送功率进行有效调控之后, 则系统能量效率便会得到提升.

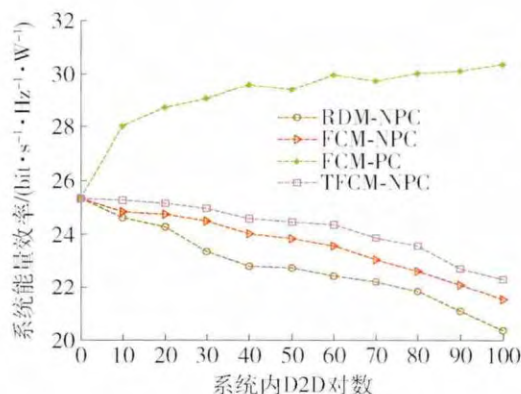


图 5 系统能量效率比较

Fig. 5 System energy efficiency comparison

FCM-PC 对 D2D 用户的发送功率进行了有效控制, 因而该算法下系统的能量效率得到了提升. 此外, FCM-PC 对无线资源的分配更为有效, 能够最大程度地减小系统内同频干扰. 而采用 FCM-NPC、TFCM-NPC 以及 RDM-NPC 没有对功率进行控制, 用户使用随机发送功率, 此时系统能量效率会随着 D2D 用户数的增加而下降.

5 结论

1) 本文所提出的联合功率控制的 D2D 资源分配算法, 在资源分配阶段基于改进型的 FCM 算法来确定初始聚类数目和聚类中心, 有效解决了聚类分组中野值问题.

2) 在分组过程中综合考虑了用户的多个属性, 并且将欧式距离较大的用户分为一个用户组, 从而降低了用户之间的同频干扰, 提高了系统吞吐量以及系统满意度.

3) 在基于最小中断概率原则为每个 D2D 组寻找最优蜂窝用户资源之后, 以用户成功通信概率为代价函数, 对组内 D2D 用户的发送功率进行调控, 从而提高了系统能量效率.

参考文献:

- [1] XU S, XIA C, KWAK K S. Overlapping coalition formation games based interference coordination for D2D underlaying LTE-A networks [J]. *Aeu-International Journal of Electronics and Communications*, 2016, 70(2): 204-209.
- [2] LEONARDO M, MASSIMO C, GIUSEPPE A, et al. When D2D communication improves group oriented services in beyond 4G networks [J]. *Wireless Networks*, 2015, 21(4): 1363-1377.
- [3] CHEN P, XUE J, CHEN Y, et al. Resource allocation algorithm based on fuzzy cluster grouping for device-to-device communication [C]// *Communications in Computer and Information Science*. Hefei: Springer Verlag, 2015: 33-44.
- [4] ZHAO H, CAO Y, LIU Y. Interference cancellation for relay-assisted D2D communication [J]. *KSH Transactions on Internet and Information Systems*, 2015, 9(9): 3276-3292.
- [5] ABDALLAH M, ABDALLAH S, HANAN L. Wireless resource virtualization with device-to-device communication underlaying LTE network [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2015, 61(4): 734-740.
- [6] CHENG H, CHEN L, YOUHU A. Interference suppression algorithms for D2D communication underlaying cellular networks [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2015, 11(18): 6705-6717.
- [7] CHEN X, HU R Q, JEON J, et al. Energy efficient resource allocation for D2D communication underlaying cellular networks [C] // *International Conference on Communications*. London: IEEE, 2015: 2943-2948.
- [8] WANG B, CHEN L, CHEN X, et al. Resource allocation optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks [C] // *IEEE Vehicular Technology Conference*. Budapest: IEEE, 2011.
- [9] MLADEN B, MARKUS K, WOLFGANG K, et al. Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications [C] // *Wireless Communications and Networking Conference*. Istanbul: IEEE, 2014, 1679-1684.
- [10] WANG F, XU C, SONG L, et al. Energy-aware resource allocation for device-to-device underlay communication [C] // *International Conference on Communications*. Budapest: IEEE, 2013: 6076-6080.
- [11] WEI L, HU R Q, QIAN Y, et al. Enable device-to-device communications underlaying cellular networks: challenges and research aspects [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(6): 90-96.
- [12] GU J, BAE S J, HASAN S F, et al. A combined power control and resource allocation scheme for D2D communication underlaying an LTE-advanced system [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2013, E96-B(10): 2683-2692.
- [13] 陈东辉. 基于目标函数的模糊聚类算法关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
CHEN D H. Research of key techniques in fuzzy clustering based on objective function [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [14] TAN K S, LIM W H, ISA N A M. Novel initialization scheme for fuzzy C-means algorithm on color image segmentation [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(4): 1832-1852.
- [15] 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.
ZHANG H Z, WANG J. Improved fuzzy C-means clustering algorithm based on selecting initial clustering centers [J]. *Computer Science*, 2009, 36(6): 206-209. (in Chinese)
- [16] 李孟华. 蜂窝网络 D2D 资源共享优化及干扰抑制算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
LI M H. Resource sharing optimization and interference suppression algorithms for device-to-device communication underlaying cellular networks [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [17] ELKOTBY H E, ELSAYED K M F, ISMAIL M H. Shrinking the reuse distance: spectrally-efficient radio resource management in D2D-enabled cellular networks with interference alignment [C] // *2012 IFIP Wireless Days*. Dublin: IEEE, 2012.

(责任编辑 吕小红)