

# D2D 网络中基于分簇的无线资源分配机制

李方伟<sup>1</sup> 黄旭<sup>1</sup> 张海波<sup>1</sup> 刘开健<sup>1</sup> 贺晓帆<sup>2</sup>

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)<sup>1</sup>

(拉玛尔大学电子工程系 博蒙特 77710)<sup>2</sup>

**摘要** 针对用户设备电池寿命有限的问题,提出了一种基于分簇的资源分配机制。该机制结合图着色原理对 D2D 用户分簇;随后根据分簇结果,采用拍卖算法为 D2D 簇分配信道;利用非合作博弈论模型对完成信道分配的用户进行功率分配。仿真结果表明,该机制有效地延长了电池寿命,提升了用户的能量效率,同时满足了用户传输速率的需求,保证了用户获得更高的 QoS。

**关键词** D2D, 能量效率, 图着色, 拍卖算法, 博弈论

**中图分类号** TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.019

## Cluster-based Radio Resource Allocation Mechanism in D2D Networks

LI Fang-wei<sup>1</sup> HUANG Xu<sup>1</sup> ZHANG Hai-bo<sup>1</sup> LIU Kai-jian<sup>1</sup> HE Xiao-fan<sup>2</sup>

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)<sup>1</sup>

(Department of Electrical Engineering, Lamar University, Beaumont 77710, USA)<sup>2</sup>

**Abstract** A cluster-based resource allocation mechanism was proposed for the problem of the limited battery life of the user equipment. The mechanism includes three parts: D2D users are put in disjoint clusters by graph theory, and then the auction algorithm is used to allocate the channel for D2D clusters according to the clustering results. In the end, the power allocation is performed by using non-cooperative game theory model. Simulation results show that the proposed mechanism effectively extends battery life, improves the energy efficiency of the users, and satisfies the requirements of the user transmission rate, thus ensuring the users to obtain higher QoS.

**Keywords** D2D, Energy efficiency, Graph coloring, Auction algorithm, Game theory

## 1 引言

作为 LTE 及未来 5G 的关键技术之一<sup>[1]</sup>, 端到端通信 (Device-to-Device, D2D) 允许彼此邻近的用户设备在蜂窝系统的控制下直接通信。该通信方式不经过基站, 能够减轻基站负载, 缓解核心网压力, 并且能有效利用邻近通信对之间良好的信道环境增加用户传输速率, 缩短端到端时延, 提高频谱利用率和系统容量<sup>[2-3]</sup>。

虽然 D2D 通信技术有很多优点, 但它会对共享同一信道资源的蜂窝网络造成干扰, 因此我们必须制定有效的资源分配方案, 以确保 D2D 用户和蜂窝用户的正常通信。文献[4-7]主要研究了如何提高频谱利用率和系统容量等问题。文献[8]提出了一种基于迭代组合拍卖的资源分配方案, 用于优化系统速率。文献[9-10]提出了一种资源分配方案, 该方案具有不完整的信道状态信息, 将联合资源分配和干扰管理问

题制定为斯坦博格博弈, 并采用反向归纳法解决。但上述工作都忽略了能量消耗, 实际上用户设备的电池容量有限, 如果在系统设计过程中忽略了能量消耗, 电池将被很快耗尽。

文献[11-12]研究了联合信道和功率分配问题, 以提高 D2D 用户的能效, 但每个 D2D 用户只能复用一个蜂窝链路, 频谱利用率较低。文献[13]依次对系统中的各个 D2D 用户进行分簇, 采用贪婪算法来解决该问题, 但用户的发射功率是固定的。文献[14]研究了联合资源分配与功率控制问题, D2D 用户采用不低于门限值的最小发送功率, 这虽然可以降低能耗, 但发射功率过低会使数据传输速率受到很大限制, 且通信中断的概率也会大幅提高。文献[15-16]分别提出了基于迭代组合拍卖法和二分法的分布式资源分配算法, 但这两种方法都没有考虑用户的服务质量 (Quality of Service, QoS)。

针对上述问题, 本文综合考虑系统中用户的 QoS 和电路

收到日期: 2017-07-07 返修日期: 2017-10-18 本文受国家自然科学基金(61271260, 61301122), 重庆市科委项目(cstc2014jcyjA40052), 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT16R72)资助。

**李方伟**(1960—), 男, 教授, 主要研究方向为认知无线电、移动通信安全, E-mail: lifw@cqupt.edu.cn (通信作者); **黄旭**(1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为异构网络中无线资源管理, E-mail: huangxu\_1993@foxmail.com; **张海波**(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为移动通信理论与技术、异构网络中无线资源管理; **刘开健**(1981—), 女, 讲师, 主要研究方向为物联网; **贺晓帆**(1985—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为信息系统和网络安全。

消耗,以最大化系统中各用户的能量效率为优化目标,提出了一种基于分簇的资源分配机制。该机制包括以下3个部分:1)对D2D用户分簇,本文运用图论中的无向图理论和蚁群遗传算法得到最优分簇方案,且随着异构网络场景的变化,无向图会动态改变,从而形成新的分簇方案,因此本文算法具有自适应性;2)为D2D簇分配信道,本文运用拍卖算法,同时采用组内共享、组间正交的方式分配信道资源,有效抑制了跨层干扰并减小了同层干扰;3)对系统中的用户进行功率分配,本文根据不动点理论使用迭代算法,降低了算法的复杂度,进一步提升了用户的能量效率。

## 2 系统模型与服务质量分析

### 2.1 系统模型

本文中的系统模型如图1所示,考虑D2D用户密集部署的异构网络场景下的上行传输系统,该场景中包括一个小区基站(evolved NodeB, eNB)、蜂窝用户和D2D用户,其中D2D用户均匀分布在小区内。其中,D2D\_R表示接收机,D2D\_T表示发射机。两个D2D用户足够接近,满足D2D通信的最大距离约束,保证了D2D用户的服务质量。在蜂窝网络的上行链路周期内,蜂窝用户向eNB发送数据,而eNB受到来自D2D发射机的干扰。在通信过程中,D2D用户接收机收到来自共享同一信道的蜂窝用户和其他D2D用户发射机的干扰。假定信道条件服从瑞利分布,考虑信号选择不同的信道将会得到不同的信道选择性衰落(频率选择性衰落),为了完全模拟现实环境,本文假定信道条件服从瑞利分布。

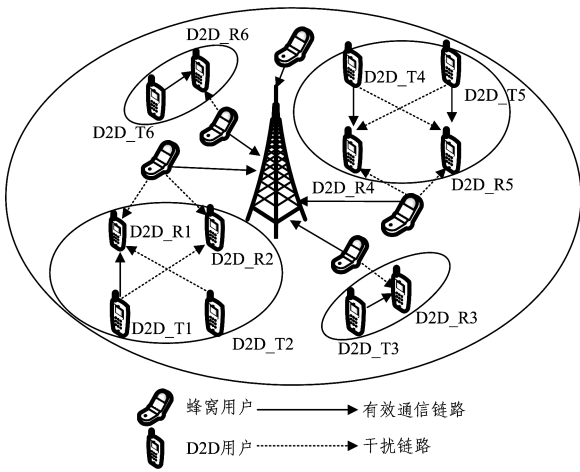


图1 系统模型

Fig.1 System model

假设系统中有 $D$ 对D2D用户, $C$ 个正交信道被 $C$ 个相应的蜂窝用户占用。定义 $D_k$ 为共享第 $k$ 个信道的D2D对集合,则第 $k$ 个信道上蜂窝用户的信干噪比为:

$$\gamma_c^k = \frac{P_c^k h_{cB}}{\sum_{d \in D_k} P_d^k h_{dc} + N_0} \quad (1)$$

第 $k$ 个信道上第 $d$ 个D2D用户的信干噪比为:

$$\gamma_d^k = \frac{P_d^k h_{dd}}{\sum_{d \in D_k, d \neq d'} P_{d'}^k h_{dd'} + P_c^k h_{cd} + N_0} \quad (2)$$

其中, $P_c^k, P_d^k, P_{d'}^k$ 分别表示信道 $k$ 上第 $c$ 个蜂窝用户、第 $d$ 个D2D用户和第 $d'$ 个D2D用户的发射功率; $h_{cB}$ 表示第 $c$ 个蜂

窝用户和eBS之间的信道增益; $h_{dc}$ 表示第 $c$ 个蜂窝用户和第 $d$ 个D2D用户之间的信道增益; $h_{dd}$ 表示D2D对之间的信道增益; $h_{dd'}$ 表示第 $d$ 个D2D用户和第 $d'$ 个D2D用户之间的信道增益; $N_0$ 表示噪声干扰。

本文分别用 $r_c^k$ 和 $r_d^k$ 表示第 $c$ 个蜂窝用户和第 $d$ 个D2D用户的速率:

$$r_c^k = \log_2(1 + \gamma_c^k) \quad (3)$$

$$r_d^k = \log_2(1 + \gamma_d^k) \quad (4)$$

本文将电池的寿命作为一个重要的优化参数。D2D用户的能量消耗包括两部分:发射能量和电路能量。电路能量是所有电路块沿着信号路径消耗的能量,因为它对电池寿命有重要影响,所以不能被忽略。为了不失一般性,本文假设所有用户具有相同的恒定电路功耗 $P_0$ 。为了捕获非线性效应,本文使用Peukert定律<sup>[17]</sup>来建模电池寿命:

$$T = \frac{C}{I^a} \quad (5)$$

其中, $C$ 是电池容量, $I$ 是放电电流, $a$ 是数值约为1.3的常数。对于发射功率为 $p_i$ 和工作电压为 $V_0$ 的用户,预计电池寿命为:

$$T_i = \frac{CV_0}{(P_i + P_0)^a} \quad (6)$$

因此,本文定义在电池的使用寿命期间,每个用户预期传输的最大数据量为:

$$u_i = r_i T_i \quad (7)$$

式(7)是用户的效用函数,用于衡量用户的能量效率。传统的能量效率是指可发送的速率与消耗的功率之间的比值,由于本文考虑了电池和功率之间的非线性作用,传统的能量效率不再适合本文研究使用。此外,传统意义上的能效是瞬时的,而此处定义的能效是指电池使用寿命期间可发送的数据量,因此更具有实际意义。

### 2.2 服务质量分析

为了保证用户的正常通信,本文主要考虑了用户的QoS要求,效用函数表示如下:

$$\max u_i(p_i, p_{-i}) = r_i T_i \quad (8)$$

$$\text{s. t. } r_i^k \geq R_{i,\min} \quad (8a)$$

$$\frac{B_{i,\min}^k}{r_i^k} \leq T_{i,\min} \quad (8b)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i^k g_{i,c}^k \leq I_{k,\max} \quad (8c)$$

$$0 \leq p_i^k \leq P_{\max} \quad (8d)$$

其中, $p_{-i}$ 表示同一信道中其他用户发射功率的集合。约束条件(8a)表示满足最小传输速率要求,约束条件(8b)表示满足最大传输时延要求,约束条件(8c)表示满足最大干扰门限要求,约束条件(8d)是功率分配变量的非负约束。本节将主要研究不同QoS要求之间的关系,如时延或干扰阈值都可以表示为传输速率的函数。

如果共有 $B$ 比特的内容必须在时间 $T$ ( $T$ 为最大时延)内发送,假设信道在优化期间是静态的,则在最大时延的QoS约束下,效用函数可表示为:

$$\max u_i(p_i, p_{-i}) = r_i T_i \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \frac{B_{i,\min}^k}{r_i^k} \leq T_{i,\min} \quad (9a)$$

$$0 \leq p_i^k \leq P_{\max} \quad (9b)$$

根据式(9a)可得,  $r_i^k T_{i,\min} \geq B_{i,\min}^k \Rightarrow r_i^k \geq \frac{B_{i,\min}^k}{T_{i,\min}} = R_{i,\min}^k$ , 因此

可以证明约束条件(9a)等价于约束条件(8a)。

干扰阈值也是影响 QoS 的一个重要因素,对于保障蜂窝用户的正常通信尤其重要。如果将  $I_{k,\max}^k$  定义为第  $k$  个蜂窝用户的最大可容忍干扰,则在最大干扰阈值的 QoS 约束下,效用函数可表示为:

$$\max u_i(p_i, p_{-i}) = r_i T_i \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N p_i^k g_{i,c}^k \leq I_{k,\max}^k \quad (10a)$$

$$0 \leq p_i^k \leq P_{c,\max} \quad (10b)$$

根据式(1)和式(3),干扰部分  $\sum_{i=1}^N p_i^k g_{i,c}^k$  可以表示为:

$$\sum_{i=1}^N p_i^k g_{i,c}^k = \frac{p_c^k h_{CB}}{2^k - 1} - N_0。根据式(10a)可得 \sum_{i=1}^N p_i^k g_{i,c}^k \leq$$

$$I_{k,\max}^k \Rightarrow \frac{p_c^k h_{CB}}{2^k - 1} - N_0 \leq I_{k,\max}^k \Rightarrow r_c^k \geq \log 2 \left( 1 + \frac{p_c^k h_{CB}}{I_{k,\max}^k + N_0} \right)。定$$

义:  $R_{c,\min}^k = \log 2 \left( 1 + \frac{p_c^k h_{CB}}{I_{k,\max}^k + N_0} \right)$ 。因此,约束条件(10a)可用

$r_c^k \geq R_{c,\min}^k$  表示,即证明约束条件(10a)等价于约束条件(8a)。

### 3 资源分配

由于 D2D 用户密集部署在小区内,信道和功率分配是一个混合整数非线性规划问题(NP 难题)。因此,本文将原始问题分为 3 个子问题,即 D2D 用户分簇问题、信道分配问题和功率分配问题。

#### 3.1 D2D 用户分簇

本文定义无向图  $G = \{V, E, W\}$ 。其中,  $V$  为顶点,表示系统中的 D2D 用户;  $E$  表示连接各点的边;  $W$  表示边的权值,权值越大, D2D 用户之间的干扰就越大,其中  $w_{ij} = \max$

$\left( \frac{p_i h_{ii}}{p_j h_{ji}}, \frac{p_j h_{jj}}{p_i h_{ij}} \right)$ 。本文基于图着色原理对 D2D 用户进行合理

分簇,将相互之间干扰小的 D2D 用户分到同一簇,相互之间干扰大的 D2D 用户分到不同簇,使同簇中的干扰总和最小,因此优化目标表示如下:

$$\min \sum_{i=1}^D \sum_{j=1, j \neq i}^D \sum_{m=1}^M e_{im} e_{jm} w_{ij} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \bigcup_{k=1}^M D_k = D \quad (11a)$$

$$D_g \cap D_k = \emptyset (g \neq k) \quad (11b)$$

$$e_{im} \in \{0, 1\} \quad (11c)$$

$$e_{jm} \in \{0, 1\} \quad (11d)$$

其中,约束条件(11a)保证所有 D2D 用户都被分配,约束条件(11b)保证一个 D2D 用户只能被分配一次。  $e_{im} = 1$  表示第  $i$  个 D2D 用户被分到第  $m$  个组,  $e_{im} = 0$  表示第  $i$  个 D2D 用户没有被分到第  $m$  个组。

分簇依然是一个 NP 难问题,本文采用蚁群遗传算法(Ant Colony Genetic Algorithm, ACGA)来解决 D2D 用户分簇的问题,ACGA 算法的优点在于以遗传算法为根本,首先经过蚁群算法的一次迭代获得一个优秀的初始种群解集,为遗传算法的基本操作提供基础,然后采用改进的遗传算法寻

求分簇结果,以为原始问题找到最优解。

ACGA 算法的详细描述如算法 1 所示。

#### 算法 1 D2D 用户分簇算法

输入: D2D 用户之间的干扰矩阵

输出: D2D 用户的分簇结果  $D_m (m=1, \dots, M)$

步骤 1 初始化: 设定蚁群算法参数  $\alpha, \beta, \rho$  和  $Q$ , 令路径  $(i, j)$  上的初始信息量  $\tau_{ij}(t) = 1, \Delta\tau(0) = 0$ ;

步骤 2 将  $m$  只蚂蚁随机放到  $n$  个顶点上;

步骤 3 计算蚂蚁  $k$  的转态转移概率  $p_{ij}$ , 选择下一个着色顶点, 并将该点加入到禁忌表中;

步骤 4 重复步骤 3, 分别求出  $m$  只蚂蚁的一次遍历路径, 并将此结果作为遗传算法的初始种群;

步骤 5 初始化遗传算法的参数: 种群规模  $NP = m$ , 交叉概率  $p_c$ , 变异概率  $p_m$ , 最大代数  $NG$ , 初始时刻  $t = 0$ ;

步骤 6 计算种群中每个个体的适应度函数值  $f_i$ , 其中  $f_i$  为优化目标(11);

步骤 7 执行选择、交叉和变异等操作产生新的分簇结果;

步骤 8 若  $t < NG$ , 则  $t = t + 1$ , 返回步骤 6; 否则遗传算法终止。

#### 3.2 D2D 簇信道分配

根据上一步分簇结果可知,信道分配的主要目标是在满足用户 QoS 的约束下,为各个 D2D 簇分配不同的正交信道,最大化组合效用。本文采用拍卖算法,将 D2D 簇视为竞拍者,将信道视为竞拍的物品。如果竞拍者  $k$  赢得第  $i$  个信道,那么该簇内的所有用户都在此信道上通信。因为蜂窝用户和 D2D 用户共享信道资源,所以将明显提高系统的能量效率。考虑到正值限制,当第  $k$  个 D2D 簇使用第  $i$  个信道资源时,本文定义竞拍者的性能增益为:

$$v(i, k) = \max(u(i, k) - u(i, \emptyset), 0) \quad (12)$$

其中,  $u(i, k)$  表示在第  $i$  个信道上蜂窝用户和 D2D 用户的能效之和,  $u(i, \emptyset)$  表示在第  $i$  个信道上只有蜂窝用户时的能效。本节中,每个 D2D 用户在计算最优发射功率时只考虑了自身与蜂窝之间的干扰,而忽略了 D2D 用户之间的干扰。在拍卖中, D2D 用户通过共享信道资源提高了自身能量效率,但它也会付出一定的代价,如共道干扰。为了体现拍卖的公平性,本文采用线性匿名价格,支付价格表示如下:

$$P_i(k) = \sum_{d \in D_k} \beta p_d^k \quad (13)$$

其中,  $p_d^k$  表示 D2D 用户消耗的功率,  $\beta$  表示单位功率的价格,  $P_i(k)$  表示集合  $D_k$  的支付价格。因此,竞拍者的效用函数(即它对信道  $i$  的满意度)可定义为:

$$U_i(k) = v_i(k) - P_i(k) \quad (14)$$

定义一个二元变量  $\chi_{ik}$  来表示信道分配结果,给定竞拍者对物品的效用函数,则目标函数为:

$$\max \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^D \chi_{ik} U_i(k) \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^D \chi_{ik} \leq 1, \forall i \in (1, 2, \dots, C) \quad (15a)$$

$$\sum_{i=1}^C \chi_{ik} \leq 1, \forall k \in (1, 2, \dots, D) \quad (15b)$$

$$r_d^k \geq R_{d,\min} \quad (15c)$$

$$r_c^k \geq R_{c,\min} \quad (15d)$$

$$0 \leq p_d^k, p_c^k \leq P_{\max} \quad (15e)$$

其中,约束条件(15a)表示一个竞拍者最多可以得到一个物品;约束条件(15b)表示一个物品最多被分配一次;约束条件(15c)和(15d)保证了用户在信道上能够正常通信;约束条件(15e)限制了用户的最大发射功率。信道分配算法的详细描述如算法2所示。

### 算法2 D2D簇信道分配算法

输入:D2D用户的分簇结果  $D_m$ , D2D用户的速率需求  $R_{d,\min}$ , 蜂窝用户的速率需求  $R_{c,\min}$

输出:信道分配结果  $\chi_{ik}$

步骤1 设置拍卖轮次指针  $t=0$ 、初始价格  $\theta^0$ 、固定价格减量  $\Delta$ , 令  $B_c=0, \forall c \in (1, 2, \dots, C), B_k=0, \forall k \in (1, 2, \dots, D_K)$ 。

步骤2 竞拍者  $k (\forall k \in 1, 2, \dots, D_K \text{ 且 } B_k=0)$  根据式(14)计算信道  $i$  (满足  $B_i=0$ ) 上的效用函数  $U_i(k)$ , 并提交报价:  $b_i^k(k)=U_i(k)$ 。

步骤3 基站收集本轮所有竞拍者提交的报价, 并找出最高的报价  $b_i^k(k')$ 。如果  $b_i^k(k') \geq 0$ , 那么将第  $i'$  信道分给第  $k'$  个 D2D 用户组, 并令  $B_i=1, B_{k'}=1$ ; 否则不分配。

步骤4 如果所有的信道都分配完毕或者每个 D2D 簇都得到了一个信道资源, 算法结束; 否则令  $t=t+1, \theta^{t+1}=\theta^t-\Delta$ , 返回步骤2。

### 3.3 功率分配

完成信道分配后, 最初的资源分配问题就转化为各用户的功率分配问题。考虑到系统中用户仅对最大化自身的能量效率感兴趣, 本文将用户功率分配问题建模为非合作博弈论模型, 参与者为同一信道中的所有用户, 策略空间为:  $P_i \in [0, p_{\max}]$ 。优化目标表示如下:

$$\max u_i(p_i, p_{-i}) = r_i T_i \quad (16)$$

$$\text{s. t. } r_d^k \geq R_{d,\min} \quad (16a)$$

$$r_c^k \geq R_{c,\min} \quad (16b)$$

$$0 \leq p_i^k, p_d^k \leq P_{\max} \quad (16c)$$

当其他参与者的策略集为  $p_{-i}$  时, 假设用户  $i$  的最优行动集为  $B_i(p_{-i})$ , 本文定义最优反应函数为:

$$B_i(p_{-i}) = \min(p_i^*, p_{\max}) \quad (17)$$

其中, 对于  $\forall p_i \in P_i$ , 都有  $u(p_i^*, p_{-i}) > u(p_i, p_{-i}), p_i^* \in [0, +\infty)$  且唯一, 证明如下。

为便于证明, 定义用户  $i$  的信道速率为:  $r_i = \log_2(1 + p_i \beta_i)$ , 令  $\beta_i = \frac{h_i}{I_i + N_0}$ , 其中,  $h_i$  为信道增益,  $I_i$  为用户  $i$  受到来自于其他用户的干扰, 仅与其他用户的发射功率有关。因此对效用函数  $u_i$  关于  $p_i$  求导可得:  $\frac{\partial u_i}{\partial p_i} = \frac{CV_i^0}{(p_i + p_0)^{a+1} \ln 2}$

$[\frac{(p_i + p_0)\beta_i}{1 + p_i\beta_i} - a \ln(1 + p_i\beta_i)]$ , 令  $f_i = \frac{(p_i + p_0)\beta_i}{1 + p_i\beta_i} - a \ln(1 + p_i\beta_i)$ 。

因为  $\frac{\partial f_i}{\partial p_i} = \beta_i \frac{1 - p_0\beta_i - a(1 + p_i\beta_i)}{(1 + p_i\beta_i)^2}$  且  $a > 1$ , 所以对于

$\forall p_i > 0$ , 都有  $\frac{\partial f_i}{\partial p_i} < 0$ , 即  $f_i$  在区间  $(0, +\infty)$  上单调递减。又

因为  $f_i(0) = p_0\beta_i > 0, f_i(-\infty) = -\infty$ , 所以存在唯一的点  $p_i^* > 0$ , 使得  $f_i(p_i^*) = 0$ , 且该点是效用函数  $u_i$  的全局最大点, 证毕。

参与者根据自身效用函数进行多次博弈, 最终会达到纳

什均衡, 这个均衡存在且唯一, 证明如下。

#### 1) 纳什均衡存在性证明

纳什均衡存在必须同时满足以下两个条件: 参与者的策略空间是欧几里德空间中非空的、闭的、有界的凸集; 效用函数是连续拟凹的。

本文定义参与者的策略空间  $[0, p_{\max}]$  是一个由实数组成的有界闭区间; 效用函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  在  $p_i$  上显然是连续的。

如果对于  $\forall p_i', p_i \in [0, p_{\max}]$ , 都有  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > \min(u(p_i, p_{-i}), u(p_i', p_{-i}))$ , 其中  $\alpha \in (0, 1)$ , 则函数  $u_i$  是拟凹的。为了不失一般性, 假设  $p_i < p_i'$ , 当  $p_{\max} < p_i^*$  时, 由存在唯一的全局最大点证明可知,  $f_i > 0$ , 因此  $u_i$  在  $[0, p_{\max}]$  上单调递增, 即  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > u(p_i, p_{-i})$ 。当  $p_{\max} > p_i^*$  时, 有以下3种情况:

① 如果  $p_i' < p_i^*$ , 对于  $\forall p_i \in [0, p_i^*]$ , 都有  $f_i > 0, u_i$  在区间  $[0, p_i^*]$  上单调递增, 因此  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > u(p_i, p_{-i})$ 。

② 如果  $p_i > p_i^*$ , 对于  $\forall p_i \in [p_i^*, p_{\max}]$ , 都有  $f_i < 0, u_i$  在区间  $[p_i^*, p_{\max}]$  上单调减, 因此  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > u(p_i', p_{-i})$ 。

③ 如果  $p_i < p_i^* < p_i'$ , 令  $\alpha' = \frac{p_i' - p_i^*}{p_i' - p_i}$ , 当  $\alpha < \alpha'$  时,  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > u(p_i, p_{-i})$ ; 当  $\alpha > \alpha'$  时,  $u(\alpha p_i + (1-\alpha)p_i', p_{-i}) > u(p_i, p_{-i})$ , 因此效用函数  $u_i(p_i, p_{-i})$  是拟凹的, 证毕。

#### 2) 纳什均衡唯一性证明

令迭代函数  $b(p) = B_i(p_{-i})$ , 证明纳什均衡的唯一性只需要证明  $b(p)$  同时满足以下3个条件:

① 正性, 即  $b(p) > 0$ ;

② 单调性, 即如果  $p_i \geq p_i'$ , 那么  $b(p_i) \geq b(p_i')$ ;

③ 可扩展, 即  $\forall \theta > 1$ , 有  $\theta b(p) > b(\theta p)$ 。

因为最优反应函数  $B_i(p_{-i})$  总是为正, 所以条件①成立。

令  $f_i(p_i^*) = 0$ , 由前文证明可知, 当  $p_{\max} < p_i^*$  时,  $u_i$  在  $[0, p_{\max}]$  上单调递增, 因此对于  $\forall p_i \in [0, p_{\max}]$ , 有  $b(p) = p_{\max}$ ; 当  $p_{\max} > p_i^*$  时,  $p_i^*$  是  $u_i$  的全局最大点, 即  $b(p) = p_i^*$ 。即对于  $\forall p_i \geq p_i'$ , 都有  $b(p_i) = b(p_i')$ , 因此条件②成立。

针对条件③的证明可参考文献[20]。综上所述,  $b(p) = B_i(p_{-i})$  满足以上3个条件, 因此纳什均衡解唯一, 证毕。

因为纳什均衡存在且唯一, 所以本文根据不动点理论使用迭代算法来寻找均衡点。令  $p_i^n$  表示第  $i$  轮第  $n$  个用户的发射功率, 则具体迭代流程如下:

步骤1  $n=0, p_i^0=0, \epsilon > 0$ ;

步骤2 对于  $\forall i$ , 根据最优反应函数(17)更新功率,  $p_i^{n+1} = B_i(p_i^n)$ ;

步骤3 如果  $|p_i^{n+1} - p_i^n| < \epsilon$  成立, 那么结束算法; 否则,  $n=n+1$ , 并返回步骤2。

### 4 算法复杂度分析

本文算法在具体实现时分为3步: D2D用户分簇、D2D簇信道分配和功率分配。在本文算法的第一个步骤中, 需要

计算 D2D 用户对之间的干扰权值,采用蚁群遗传算法实现分簇,其算法复杂度为  $O(mD^2)$ ;在第二个步骤中,每个簇只能分配一个信道,每个信道最多被分配一次,其算法复杂度为  $O(CK)$ ;求解系统用户的最优功率时,如果迭代  $Q$  次,那么算法复杂度为  $O(Q * (C+D))$ 。其中,  $m$  表示蚁群数量,  $k$  表示分簇数量,且  $k < D$ 。因此,本文算法的复杂度为  $\max(O(mD^2), O(CK), O(Q * (C+D))) = O(mD^2)$ 。

## 5 仿真分析

本文将 D2D 异构网络模拟为 3GPP 标准规定的城市部署场景<sup>[18]</sup>。信道增益主要考虑路径损耗、阴影衰落和天线增益。具体仿真参数如表 1 所列。本文分别从功率消耗、用户平均可发送数据量、用户平均电池使用时间和系统速率 4 个方面分析了算法对系统性能的影响。本文中对比算法为未分簇的随机资源分配算法和添加了本文功率控制的分簇算法<sup>[13]</sup>。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

仿真参数	数值
小区半径/m	350
载波频率/GHz	2.0
系统带宽/MHz	10
RB 带宽/kHz	180
蜂窝用户数量	30
D2D 用户对数量	5~30
蜂窝用户最大发射功率/dB	23
D2D 用户最大发射功率/dB	23
高斯噪声功率/(dBm/Hz)	-174
电路功率消耗	50mW(17dB)
工作电压/V	4
电池容量/(mA·h)	800
$\epsilon$ /mA	1
基站天线增益/dBi	14
用户天线增益/dBi	0
阴影衰落模型	标准差为 8 dB 的正态分布
D2D 用户之间的路径损耗	自由空间模型 <sup>[19]</sup>
其他用户之间的路径损耗	COST231 Hata 模型 <sup>[19]</sup>

本文将蚁群算法和遗传算法相结合,首先利用信息素的蚁群算法收敛速度快的特性,使全局蚂蚁经过一次寻优即可获得一个较为优秀的解集,将此解集作为遗传算法的初始种群,同时对基本的遗传算子作出改进。本文算法可以有效地减少遗传算法的寻优迭代次数,加快收敛速度,提高算法的执行效率。由表 2 可知,本文算法能够在较少的迭代次数下收敛到最优解,从而快速准确地得到 D2D 用户对的分簇结果。

表 2 D2D 用户对分簇时算法的平均收敛代数

Table 2 Average convergence algebra of algorithm when D2D users are clustering

D2D 用户对数量	10	15	20	25	30
平均收敛代数	28	32	36	34	35

图 2 给出了系统中 1 个蜂窝用户和 2 对 D2D 用户共享同一信道时发射功率和迭代次数之间的关系。采用 3.3 节中的迭代功率控制算法调整发射功率,停止参数  $\epsilon = 1$  mA。从

图 2 中可以看出,发射功率在第五次迭代时达到收敛。参数  $\epsilon$  用于控制收敛的速度。对于较大的  $\epsilon$ ,功率控制算法收敛得更快,但误差更大,反之亦然。

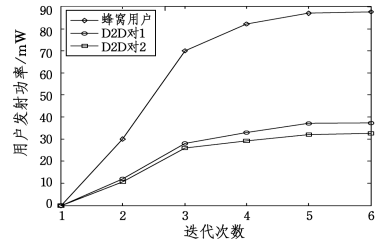


图 2 系统中用户发射功率随迭代次数的变化

Fig. 2 Variation of user transmit power with iteration number in system

图 3 给出了 3 种算法下系统的总功率消耗。从图 3 中可以看出,随着 D2D 用户数量的增加,所有曲线都呈现上升趋势,说明系统的总功率消耗在不断增加。这是因为每个接入到蜂窝网络中的 D2D 用户都需要消耗能量以满足自身的通信需求。未分簇的随机资源分配算法由于缺少分簇环节,同层干扰较大,同时不合理的信道分配会造成严重的跨层干扰,因此需要通过增大发射功率来提升能量效率。文献[13]根据蜂窝用户的抗干扰能力依次对系统中的各个 D2D 用户进行分簇,所得结果并不是最优分簇方案,同层干扰未能降到最低。本文所提分簇算法同时考虑系统中所有的 D2D 用户对,分簇结果更加合理,同层干扰较小,因此用户选择较小的发射功率就能使自身的能量效率最大。而文献[13]采用本文提出的功率分配算法,因此两者的功率消耗相差不大。

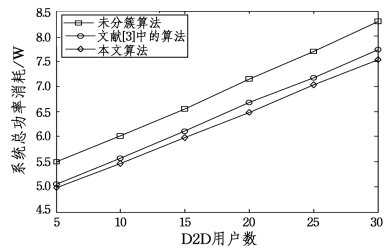


图 3 不同 D2D 用户数量下的系统总功率消耗

Fig. 3 Total power consumption for different numbers D2D users

图 4 和图 5 分别给出了不同 D2D 用户数量下系统中各个用户的平均发送数据量和电池使用时间。从图 4 和图 5 中可以看出,D2D 用户的性能均高于蜂窝用户。随着 D2D 用户数量的增加,蜂窝用户受到的干扰逐渐增大,因此蜂窝用户的性能逐渐降低。由于 D2D 用户间的距离较近,信道条件好,其他用户对 D2D 用户接收端造成的干扰与较好的信道条件相比产生的影响更小,因此 D2D 用户的性能基本不变。未分簇的随机资源分配算法的资源不合理分配会导致用户间存在严重的干扰,因此其能效和电池寿命都最低。文献[13]中的算法根据蜂窝用户能够承受的干扰大小进行分簇,保证了蜂窝用户的通信质量,但 D2D 用户间的干扰并未得到有效的控制,降低了用户的性能。本文提出的分簇算法对 D2D 用户进

行了合理分簇,有效地抑制了 D2D 用户间的干扰,并且通过信道分配和功率控制进一步减小了跨层干扰和同层干扰,因此本文提出的分簇算法的能量效率最高且电池寿命最长。

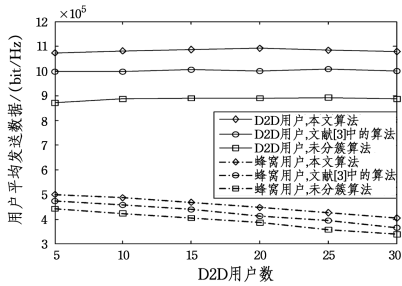


图 4 不同 D2D 用户数量下用户的平均可发送数据量

Fig. 4 Average number of users sending data with different numbers of D2D users

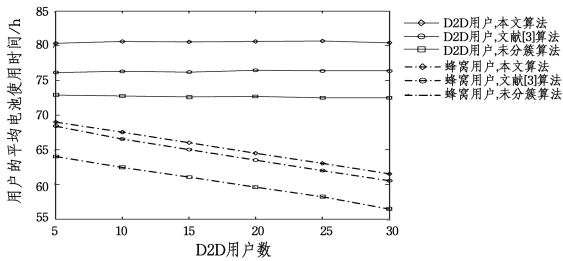


图 5 不同 D2D 用户数量下用户的平均电池使用时间

Fig. 5 Average battery life with different numbers of D2D users

图 6 给出了不同 D2D 用户数下的系统吞吐量。D2D 用户数量的增加会对系统产生更强的干扰,从而降低蜂窝用户的平均发射速率。但由于 D2D 用户间的信道增益较好,平均发射速率更高,因此系统和速率随着 D2D 用户数量的增加而增加。从图 6 中可以发现,文献[13]中的算法和未分簇的随机资源分配算法的系统吞吐量均低于本文提出的分簇算法,这是因为在本文提出的分簇算法下,用户的平均干扰更低,受干扰的蜂窝用户数目更少,尽可能地使整个系统产生的干扰降至最低。

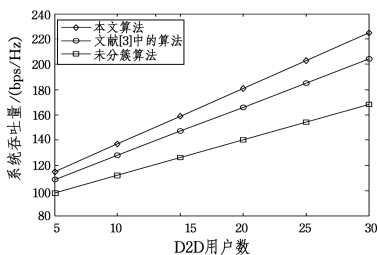


图 6 不同 D2D 用户数量下的系统吞吐量

Fig. 6 System throughput for different numbers of D2D users

**结束语** 本文讨论了 D2D 异构网络中在用户电池寿命有限的情况下的能效优化问题,提出了一种基于分簇的无线资源分配机制,该机制包括分簇算法、信道分配算法和功率分配算法。该机制在保证用户 QoS 需求的前提下,不仅有效地延长了电池寿命,而且能降低系统能耗,同时满足了用户传输速率的需求,保证了用户的通信质量。

## 参考文献

- [1] MARSCH P, SILVA I D, ELAYOUBI S E, et al. Preliminary views and initial considerations on 5G RAN architecture and functional designs [EB/OL]. <https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/5G-PPPMETIS-II-5G-RAN-Architecture-White-Paper.pdf>.
- [2] HUANG H C, ZHANG J, ZHANG Z F, et al. Interference-Limited device-to-device multi-user cooperation Scheme for optimization of edge networking [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2016, 31(6): 1096-1109.
- [3] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(5): 86-92.
- [4] ZHANG H, LIAO Y, SONG L. D2D-U: device-to-device communications in unlicensed bands for 5G system [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3507-3519.
- [5] PAN J Y, HSU M H. Relay selection of relay-assisted device-to-device and uplink communication underlying cellular networks [C] // 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Santa Clara, CA, 2017: 980-985.
- [6] XIANG M, LI M X, MING Z, et al. Statistical QoS-driven resource allocation and source adaptation for D2D communications underlying OFDMA-based cellular networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(99): 3981-3999.
- [7] YANG T, ZHANG R, CHENG X, et al. Graph coloring based resource sharing (GCRS) scheme for D2D communications underlying Full-Duplex cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 99(PP): 1.
- [8] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: A reverse iterative combinatorial auction based approach [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(9): 348-358.
- [9] BU S, YU F R, SENARATH G. Interference-aware energy-efficient resource allocation for heterogeneous networks with incomplete channel state information [J]. *IEEE International Conference on Communications*, 2013, 64(3): 6081-6085.
- [10] BU S, YU F R, YANIKOMEROGLU H. Interference-aware energy-efficient resource allocation for OFDMA-based heterogeneous networks with incomplete channel state information [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 1036-1050.
- [11] WANG F, XU C, SONG L, et al. Energy-efficient resource allocation for device-to-device underlay communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(4): 2082-2092.
- [12] HOANG T D, LE L B, LE-NGOC T. Energy-efficient resource allocation for D2D communications in cellular networks [C] // 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2015: 2251-2256.

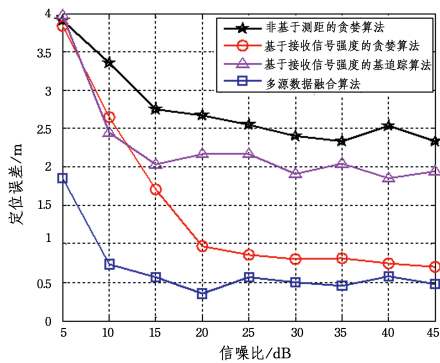


图5 噪声对定位误差的影响

Fig. 5 Effect of noise on location error

**结束语** 无线传感器网络中存在不止一种类型的传感器,而现有的压缩感知定位算法往往只能针对单一类型的数据进行定位,从而导致目标定位精度受限。因此,本文提出了一种基于数据融合的压缩感知多目标定位算法。该算法包括数据预处理和数据融合定位两个阶段,能够充分利用获得的测量数据。本文设计了基于数据融合的压缩感知目标定位算法并对已有的两种压缩感知定位数据进行了仿真,仿真证明,该算法在定位方面具有更高的精确性和稳定性。

### 参考文献

- [1] RODRÍGUEZ M D,FAVELA J,MARTÍNEZ E A,et al. Location-aware access to hospital information and services[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine,2004,8(4):448-55.
- [2] RALLAPALLI S, QIU L,ZHANG Y,et al. Exploiting temporal stability and low-rank structure for localization in mobile networks[C]//Sixteenth International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM,2010:161-172.
- [3] CANDÈS E J. Compressive sampling[C]//Proceedings of the International Congress of Mathematicians. 2006:1433-1452.
- [4] MAECHLER P,FELBER N,KAESLIN H. Compressive sensing for WiFi-based passive bistatic radar[J]. 2012:1444-1448.
- [5] CEVHER,DUARTE V M F,BARANIUK R G. Distributed target localization via spatial sparsity[C]//Signal Processing Conference,2008. European IEEE,2008:1-5.

(上接第128页)

- [13] TAO Y,SUN J,SHAO S X. Radio resource allocation based on greedy algorithm and successive interference cancellation in device-to-device (D2D) communication [C] // IET International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT 2013). Beijing,2013:452-458.
- [14] JAHEON G U,BAE S J,HASAN S F,et al. A combined power control and resource allocation scheme for D2D communication underlying an LTE-advanced system[J]. IEICE Transactions on Communications,2013,96(10):2683-2692.
- [15] WANG F,XU C,SONG L,et al. Energy-efficient radio resource and power allocation for device-to-device communication underlying cellular networks[C]//2012 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing(WCSP). IEEE,2012:1-6.
- [16] QIU X,XUEWEN L,DONG K,et al. Energy efficiency analysis

- [6] LAGUNAS E,SHARMA S K,CHATZINOTAS S,et al. Compressive sensing based target counting and localization exploiting joint sparsity[C]//IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. IEEE,2016:3231-3235.
- [7] LIU H,DARABI H,BANERJEE P,et al. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C Applications & Reviews,2007,37(6):1067-1080.
- [8] QIAN P,GUO Y,LI N,et al. Multiple target localization and power estimation in wireless sensor networks using compressive sensing[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. IEEE,2015:1-5.
- [9] HE T,HUANG C,BLUM B M,et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C]//International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2003). 2003:81-95.
- [10] XIN K,CHENG P,CHEN J. Multi-target localization in wireless sensor networks: a compressive sampling-based approach [J]. Wireless Communications & Mobile Computing,2013,15(5):801-811.
- [11] LIU L,YUAN S,LV W,et al. A Multiple Target Localization with Sparse Information in Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2016,2016:1-10.
- [12] ZHANG B,CHENG X,ZHANG N,et al. Sparse target counting and localization in sensor networks based on compressive sensing[C]//INFOCOM. IEEE Xplore,2011:2255-2263.
- [13] MISHALI M,ELDAR Y C. Reduce and Boost:Recovering Arbitrary Sets of Jointly Sparse Vectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2008,56(10):4692-4702.
- [14] YOU Y,CHEN L,GU Y,et al. Retrieval of sparse solutions of multiple-measurement vectors via zero-point attracting projection[J]. Signal Processing,2012,92(12):3075-3079.
- [15] CANDES E J,WAKIN M B,BOYD S. Enhancing sparsity by reweighted minimization[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications,2008,14(5):877-905.
- [16] FENG C,VALAEEEE S,TAN Z. Multiple target localization using compressive sensing[C]//IEEE Conference on Global Telecommunications. IEEE Press,2009:4356-4361.

- in device-to-device communication underlying cellular networks [C]//Consumer Communications and Networking Conference (CCNC),2013 IEEE. IEEE,2013:625-630.
- [17] DOERFFEL D,SHARKH S A. A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources,2006,155:395-400.
- [18] Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) [J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking,2008,14(1):172-185.
- [19] GUNDLACH M. Overview of D2D proximity services standardization in 3GPP LTE[C]//EuCNC. Bologna,2014.
- [20] SARAYDAR C,MANDAYAM N B,GOODMAN D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks[C]//IEEE Transactions on Communications. 2002:291-303.