

支持 D2D 通信的蜂窝网自适应资源分配算法

沈 悦, 刘占军, 武 汉, 胡 腾, 陈前斌

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对蜂窝与 D2D 混合网络中资源分配技术不具有自适应性、造成资源浪费的问题, 提出一种根据实际网络环境自适应调整的资源分配方案, 并设计两阶段的资源分配算法对该方案进行求解。第一阶段根据用户间的干扰自适应调整使用每个资源块的用户个数和 D2D 用户可使用的资源块个数, 第二阶段利用改进的粒子群算法以吞吐量最大为目标分配功率。仿真结果表明, 该算法的性能与穷举搜索最优算法最相近, 且系统吞吐量和 D2D 用户的接入率都明显大于固定分配的算法。

关键词: D2D 通信; 自适应; 资源分配; 资源复用; 粒子群优化

中文引用格式: 沈 悦, 刘占军, 武 汉, 等. 支持 D2D 通信的蜂窝网自适应资源分配算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(2): 107-113.

英文引用格式: SHEN Yue, LIU Zhanjun, WU Han, et al. Adaptive Resource Allocation Algorithm for Cellular Networks Supporting D2D Communication[J]. Computer Engineering, 2018, 44(2): 107-113.

Adaptive Resource Allocation Algorithm for Cellular Networks Supporting D2D Communication

SHEN Yue, LIU Zhanjun, WU Han, HU Teng, CHEN Qianbin

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

[Abstract] As to the problem that the resource allocation technology is not adaptive in the hybrid network of cellular and Device-to-Device (D2D) which causes the waste of resources, a resource allocation scheme is proposed which can be adjusted adaptively according to the actual network environment, and a two-stage resource allocation algorithm is designed to solve it. Both the number of users using every resource block and the number of resource blocks that D2D users can use are adjusted adaptively according to the interference between users in the first stage, and the improved PSO algorithm is used to allocate power which maximizes the throughput in the second stage. The simulation results show that the proposed algorithm is near optimal algorithm. Besides, the throughput of the system and the access rate of D2D users are significantly superior to the fixed allocation algorithm.

[Key words] Device-to-Device (D2D) communication; adaptive; resource allocation; resource reuse; Particle Swarm Optimization (PSO)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2018.02.019

0 概述

D2D (Device-to-Device) 通信是在一定的距离范围内用户设备直接进行通信、不需要通过基站转发的通信模式^[1]。D2D 通信由于其不仅能够改善系统性能^[2], 还能进一步扩展终端通信模式的应用前景, 受到的关注日益增多, 但是在蜂窝通信模式与 D2D 通信模式共存的网络中, 由于共享无线频谱而带来的同信道干扰成为需要解决的主要问题^[3]。为

了有效处理不同通信模式间的用户共享频谱资源所带来的干扰, 现有的资源分配主要有以下几类: 文献[4-5]提出了一个干扰限制区域的概念, 为了避免 D2D 模式通信产生有害的干扰, 只允许在干扰限制区域内蜂窝用户和 D2D 用户才能使用相同的频谱资源。文献[6]利用联合博弈算法来处理 D2D 用户的上行链路和下行链路的资源分配问题。文献[7]提出了根据干扰图来进行用户分簇, 然后再利用匈牙利算法对不同用户簇进行资源块的分配, 但是没

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2014AA01A701); 重庆市教委科研项目 (KJ120510)。

作者简介: 沈 悦 (1992—), 女, 硕士研究生, 主研方向为无线接入网资源分配; 刘占军, 副教授、博士; 武 汉、胡 腾, 硕士研究生; 陈前斌, 教授、博士。

收稿日期: 2017-01-04

修回日期: 2017-02-22

E-mail: kimjpcy@163.com

有考虑蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量。文献[8]利用 Stackelberg 博弈模型提出一个分布式的资源分配方案,并且设计了一个迭代算法来解决这个问题,虽然蜂窝用户的服务质量得到了保证,但是对 D2D 用户的服务质量仍未做考虑。文献[9]提出一种贪婪启发式算法,按照干扰度的大小,D2D 用户选择复用相应的蜂窝用户资源,但是使用的是固定的功率值,没有进行功率分配。

上述的研究对资源的复用情况大都是固定的,比如文献[4-5]中一个蜂窝用户的资源只允许一对 D2D 用户复用,文献[6]中一对 D2D 用户只能复用一对蜂窝用户的资源。事实上,从 D2D 模式灵活使用资源的特性来讲,允许一个 D2D 用户复用多个蜂窝用户的资源对 D2D 用户的性能提升很大;从空间复用的角度来讲,允许多个 D2D 用户与一个蜂窝用户复用资源对提升系统整体的性能是有益的。现有技术使用的固定分配方法在用户通信模式发生变化的情况下,不能及时地调整资源分配的方案,造成资源的浪费。针对这个问题,本文提出一种对用户模式进行自适应资源分配的方案。

1 系统模型

本文考虑的是基于正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)的支持 D2D 通信模式与蜂窝通信模式共存的单小区无线通信系统^[10]。小区内随机分布 K 个处于蜂窝通信模式的用户和 D 对处于 D2D 通信模式的用户,使用蜂窝通信模式的用户集合为 $\kappa = \{1, 2, \dots, K\}$,使用 D2D 通信模式的用户集合为 $\bar{D} = \{1, 2, \dots, D\}$ 。理论上蜂窝通信模式用户的上行资源和下行资源都可以被 D2D 通信模式的用户使用,但是考虑到在实际的场景中上行资源的利用没有下行资源充分,并且在复用上行资源的时候受干扰的是基站而复用下行资源的时候受干扰的是用户设备,相比较而言基站处理干扰的能力更强。因此,本文采用的是 D2D 用户复用蜂窝用户上行资源的场景。

系统总的资源块个数为 N 个,资源块集合为 $\bar{N} = \{1, 2, \dots, N\}$,为了确保蜂窝用户的服务质量,资源块总数不小于蜂窝用户的个数,即 $N \geq K$ 。假设信道是瑞利衰落信道,定义 $h_{m1,m2}^{(n)}$ 为在资源块 n 上用户 $m1$ 到 $m2$ 的信道增益。若 $m1 = m2$ 则 $h_{m1,m2}^{(n)}$ 表示 D2D 用户的发送端到接收端在资源块 n 上的信道增益;若 $m2 = \text{BS}$ (Base Station) 则 $h_{m1,m2}^{(n)}$ 表示蜂窝用户 $m1$ 或者是 D2D 用户 $m1$ 到基站在资源块 n 上的信

道增益。 $P_k^{(n)}, k \in \kappa$ 和 $P_d^{(n)}, d \in \bar{D}$ 分别表示蜂窝用户 k 和 D2D 用户 d 在资源块 n 上的发射功率。

$\Omega_m^{(n)}$ 表示资源块 n 的使用情况,若资源块 n 被用户 m ($m \in \bar{D}$ 时为 D2D 用户, $m \in \kappa$ 时为蜂窝用户)使用则为 1,否则为 0。蜂窝通信模式的用户间使用正交的资源块,而 D2D 通信模式的用户可以根据当前的网络环境选择使用资源块的情况。根据香农公式,D2D 用户和蜂窝用户在第 n 个资源块上获得的吞吐量 $R_d^{(n)}$ 和 $R_k^{(n)}$ 分别表示为:

$$R_d^{(n)} = B \lg \left(1 + \frac{\Omega_d^{(n)} P_d^{(n)} h_{d,d}^{(n)}}{\sum_{i=1}^K \Omega_i^{(n)} P_i^{(n)} h_{i,d}^{(n)} + \sum_{j \in \bar{D}} \Omega_j^{(n)} P_j^{(n)} h_{j,d}^{(n)} + N_0} \right) \quad (1)$$

$$R_k^{(n)} = B \lg \left(1 + \frac{\Omega_k^{(n)} P_k^{(n)} h_{k,\text{BS}}^{(n)}}{\sum_{j=1}^D \Omega_j^{(n)} P_j^{(n)} h_{j,\text{BS}}^{(n)} + N_0} \right) \quad (2)$$

在式(1)中, $\sum_{i=1}^K \Omega_i^{(n)} P_i^{(n)} h_{i,d}^{(n)}$ 为与 D2D 用户 d 使用相同资源块 n 的蜂窝用户对其造成的干扰; $\sum_{j \in \bar{D}} \Omega_j^{(n)} P_j^{(n)} h_{j,d}^{(n)}$ 为与 D2D 用户 d 使用相同资源块 n 的其他 D2D 用户对其造成的干扰。在式(2)中, $\sum_{j=1}^D \Omega_j^{(n)} P_j^{(n)} h_{j,\text{BS}}^{(n)}$ 为与蜂窝用户 k 使用相同资源块 n 的 D2D 用户对其造成的干扰,由于蜂窝用户使用的是正交的资源块,因此蜂窝用户间不存在干扰。式中 B 为一个资源块的带宽; N_0 为噪声功率。

在支持 D2D 通信的蜂窝网络中,怎样在保证蜂窝用户与 D2D 用户的服务质量前提下,将引入 D2D 通信所带来的性能提升最大化是蜂窝用户与 D2D 用户自适应资源分配算法的研究目标。因此,为了满足该目标,本文以蜂窝用户和 D2D 用户的最小速率需求以及各自发射功率的限制为约束条件,以小区中蜂窝用户与 D2D 用户总的吞吐量最大为目标,合理地给蜂窝用户和 D2D 用户分配资源块和发射功率。基于上述分析,将该自适应资源分配问题建模为一个带有约束条件的最优化问题,如下所示:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D R_d^{(n)} + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K R_k^{(n)} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N R_k^{(n)} \geq \zeta_c, \quad \forall k \in \kappa \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N R_d^{(n)} \geq \zeta_d, \quad \forall d \in \bar{D} \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N \Omega_k^{(n)} P_k^{(n)} \leq P_c, \quad \forall k \in \kappa \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^N \Omega_d^{(n)} P_d^{(n)} \leq P_d, \quad \forall d \in \bar{D} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \Omega_k^{(n)} \leq 1, \quad \forall n \in \bar{N} \quad (8)$$

式(4)和式(5)保证了蜂窝用户和D2D用户的服务质量, ζ_c 和 ζ_d 为各自的最小通信速率;式(6)和式(7)限制了蜂窝用户和D2D用户的最大发射功率;式(8)表示一个资源块最多只分配给一个蜂窝用户使用,而分配给D2D用户使用的情况则不做出任何限制。可以发现该约束优化问题是一个混合非线性整数规划问题,直接求解十分困难,因此本文将原优化问题分为2个子问题,提出一种包括资源块分配和功率分配的两阶段资源分配算法,降低了求解的复杂度。

2 资源块分配

在资源块分配阶段,D2D用户和蜂窝用户在每个资源块上的发射功率设定为平均功率。随着资源块个数和用户数的增加,通过穷举搜索法得到最优解的计算复杂度是呈指数倍增长,这使得其在实际的应用中实现起来非常困难。为了减小计算的复杂度,本文提出基于贪婪算法的资源块分配。

贪婪算法的主要思想是在对问题进行求解的过程中,每次做出的选择总是当前情况下最好的。基于该思想将其应用到上述要求解的资源块分配问题中则是根据优化问题的目标函数最大化总吞吐量,在满足约束条件的情况下,每次做出使得吞吐量最大的选择。因此,首先在保证蜂窝用户达到最小速率的条件下,根据一个蜂窝用户和一对D2D用户复用同一资源块获得的吞吐量情况选择出使得吞吐量最大的资源块和用户组合,然后再通过每次加入一对D2D用户使用该资源块,使得吞吐量得到最大的提升,直到不管再加入哪对D2D用户都不能使吞吐量提升为止。当所有蜂窝用户的服务质量都得到保证后,则再根据一个蜂窝用户和一对D2D用户,以及两对D2D用户复用同一资源块获得的吞吐量情况选择出使得吞吐量最大的用户和相应的资源块,然后再根据相同的规则加入使用该资源块的D2D用户直到吞吐量不再提升为止。

将每个资源块在不同的用户模式下关于吞吐量的 $K \cdot (D+1) \cdot N$ 维矩阵定义为蜂窝用户与D2D用户的吞吐量结合矩阵,表示为 $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_{k,d}^{(n)}\}_{K \cdot (D+1) \cdot N \times N}$ 。 $\mathbf{R}_{k,d}^{(n)}$ 是2种不同通信模式的用户复用资源块 n 时获得的总吞吐量。当 $k \in \kappa, d \in \bar{D}$ 时,表示蜂窝用户 k 和D2D用户 d 复用同一资源块 n 时获得的吞吐量之和;当 $k \in \kappa, d = D+1$ 时,表示蜂窝用户 k 单独使用资源块 n 时获得的吞吐量。它的值表示为:

$$\mathbf{R}_{k,d}^{(n)} = \begin{cases} B \lg \left(1 + \frac{P_d^{(n)} h_{d,d}^{(n)}}{P_k^{(n)} h_{k,d}^{(n)} + N_0} \right) + B \lg \left(1 + \frac{P_k^{(n)} h_{k,BS}^{(n)}}{P_d^{(n)} h_{d,BS}^{(n)} + N_0} \right), & d \in \bar{D} \\ B \lg \left(1 + \frac{P_k^{(n)} h_{k,BS}^{(n)}}{N_0} \right), & d = D+1 \end{cases} \quad (9)$$

将每个资源块在任意用户模式(除去2个用户都是蜂窝通信模式)下关于吞吐量的 $(K+D) \cdot (D+1) \cdot (N-K)$ 维矩阵定义为用户间吞吐量结合矩阵,表示为 $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}\}_{(K+D) \cdot (D+1) \cdot (N-K) \times N}$ 。当 $u \in \kappa, d \in \bar{D}$ 时, $\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}$ 是蜂窝用户 u 和D2D用户 d 复用资源块 n 时获得的吞吐量之和;当 $u \in \kappa, d = D+1$ 时, $\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}$ 是蜂窝用户 u 单独使用资源块 n 时获得的吞吐量;当 $u, d \in \bar{D}$ 且 $u \neq d$ 时, $\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}$ 是D2D用户 u 和D2D用户 d 复用资源块 n 时获得的吞吐量之和;当 $u, d \in \bar{D}$ 且 $u = d$ 时, $\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}$ 是D2D用户 u 单独使用资源块 n 时获得的吞吐量;其余情况下 $\mathbf{R}_{u,d}^{(n)}$ 的值设置为0。它的值为:

$$\mathbf{R}_{u,d}^{(n)} = \begin{cases} B \lg \left(1 + \frac{P_d^{(n)} h_{d,d}^{(n)}}{P_u^{(n)} h_{u,d}^{(n)} + N_0} \right) + B \lg \left(1 + \frac{P_u^{(n)} h_{u,BS}^{(n)}}{P_d^{(n)} h_{d,BS}^{(n)} + N_0} \right), & u \in \kappa \text{ 且 } d \in \bar{D} \\ B \lg \left(1 + \frac{P_u^{(n)} h_{u,BS}^{(n)}}{N_0} \right), & u \in \kappa \text{ 且 } d = D+1 \\ B \lg \left(1 + \frac{P_d^{(n)} h_{d,d}^{(n)}}{P_u^{(n)} h_{u,d}^{(n)} + N_0} \right) + B \lg \left(1 + \frac{P_u^{(n)} h_{u,u}^{(n)}}{P_d^{(n)} h_{d,u}^{(n)} + N_0} \right), & u \in \bar{D} \text{ 且 } u \neq d \\ B \lg \left(1 + \frac{P_u^{(n)} h_{u,u}^{(n)}}{N_0} \right), & u \in \bar{D} \text{ 且 } u = d \\ 0, & u \in \bar{D} \text{ 且 } d = D+1 \end{cases} \quad (10)$$

首先根据蜂窝用户与D2D用户的吞吐量结合矩阵选择出需要分配的资源块 n 和使用该资源块的蜂窝用户 $m_c(1)$ 和D2D用户 $m_d(1)$, 即:

$$\{n, m_c(1), m_d(1)\} = \underset{n \in \bar{N}, k \in \kappa, d \in \bar{D} \cup \{D+1\}, R_k^{(n)} \geq \zeta_c}{\operatorname{argmax}} \mathbf{R}_{k,d}^{(n)} \quad (11)$$

当 $m_d = D+1$ 的时候说明该资源块被蜂窝用户单独占用的时候吞吐量达到最大,因此该资源块单独分配给该蜂窝用户,不与其他D2D用户复用;否则,需要添加D2D用户使用该资源块使其吞吐量提升。当蜂窝用户的服务质量得到保证后,则根据用户间吞吐量结合矩阵选择出此次需要分配的资源块

n 和使用该资源块的用户 $m_U(1)$ 和 $m_D(1)$, 即:

$$\{n, m_U(1), m_D(1)\} = \underset{n \in \bar{N}, u \in \kappa, d \in \bar{D} \cup (D+1)}{\operatorname{argmax}} R_{u,d}^{(n)} \quad (12)$$

当 $m_U(1) \in \kappa$ 且 $m_D(1) = D+1$ 的时候说明蜂窝用户 $m_U(1)$ 单独使用资源块 n 时获得的吞吐量最大, 则将该资源块 n 单独分配给蜂窝用户 $m_U(1)$ 使用; 当 $m_U(1) = m_D(1)$ 的时候说明 D2D 用户 $m_D(1)$ 单独使用该资源块 n 的时候吞吐量最大, 则将该资源块 n 单独分配给该 D2D 用户; 否则在其他情况的时候需要加入 D2D 用户使用该资源块使其吞吐量进一步提升。

使用资源块 n 的用户集合为 $X^{(n)} = X_C^{(n)} \cup X_D^{(n)}$, $X_C^{(n)}$ 是蜂窝用户中使用资源块 n 的集合, $X_D^{(n)}$ 是 D2D 用户中使用资源块 n 的集合, 加入一个 D2D 用户使用该资源块获得的吞吐量增加量为:

$$\Delta R^{(n)}(d) = R^{(n)}(X^{(n)}(t-1) \cup \{d\}) - R^{(n)}(X^{(n)}(t-1)) \quad (13)$$

D2D 用户的加入规则为:

$$m_D(t) = \underset{d \in \bar{D} \setminus X_D^{(n)}(t-1), R_d^{(n)} \geq \zeta_C}{\operatorname{argmax}} \Delta R^{(n)}(d) \quad (14)$$

蜂窝用户都满足速率需求后, D2D 用户的加入规则为:

$$m_D(t) = \underset{d \in \bar{D} \setminus X_D^{(n)}(t-1)}{\operatorname{argmax}} \Delta R^{(n)}(d) \quad (15)$$

需要注意的是, 为了保证 D2D 用户的服务质量, 在选择 D2D 用户加入使用资源块的时候将其分为 2 个不同的优先级: 未达到 D2D 用户最小通信速率需求的 D2D 用户拥有更高的优先级。这是为了避免部分 D2D 用户占用过多的资源而另一部分 D2D 用户由于未达到最小通信速率而不能成功的接入网络的情况。

根据上述分析, 本文提出的自适应资源块分配算法的具体步骤为:

步骤 1 初始化 D2D 用户集合 $\bar{D} = \{1, 2, \dots, D\}$, 蜂窝用户集合 $\kappa = \{1, 2, \dots, K\}$, 资源块集合 $\bar{N} = \{1, 2, \dots, N\}$, 低优先级 D2D 用户集合 $D' = \emptyset$, 并初始化 $X_D^{(n)} = \emptyset, X_C^{(n)} = \emptyset, \forall n \in \bar{N}$ 。

步骤 2 判断当 $|\bar{N}| \leq (N-K)$ 的时候, 转至步骤 11, 否则继续下一步骤。

步骤 3 关于资源块集合 \bar{N} 生成 D2D 用户和蜂窝用户的吞吐量结合矩阵 $R = \{R_{k,d}^{(n)}\}_{K \cdot (D+1) \cdot |\bar{N}|}$ 。

步骤 4 根据式(11)选择出本次需要分配的资源块 n 和其相对应的蜂窝用户和 D2D 用户。如果 $m_D = D+1$, 则把该资源块单独分配给蜂窝用户 m_C , 更新 $\kappa = \kappa \setminus \{m_C\}$ 和 $\bar{N} = \bar{N} \setminus \{n\}$, 转至步骤 2; 否则更

新 $X_C^{(n)} = \{m_C\}, X_D^{(n)} = \{m_D\}, \kappa = \kappa \setminus \{m_C\}$ 。

步骤 5 在高优先级的 D2D 用户集中根据式(14)选择加入使用资源块 n 的 D2D 用户 m_D 。

步骤 6 如果 $\Delta R^{(n)}(m_D) > 0$, 更新使用资源块 n 的 D2D 用户集合 $X_D^{(n)} = X_D^{(n)} \cup \{m_D\}$, 转至步骤 5; 否则继续进行下一步骤。

步骤 7 在低优先级的 D2D 用户集中根据式(14)选择加入使用资源块 n 的 D2D 用户 m_D 。

步骤 8 如果 $\Delta R^{(n)}(m_D) > 0$, 更新使用资源块 n 的 D2D 用户集合 $X_D^{(n)} = X_D^{(n)} \cup \{m_D\}$, 转至步骤 7; 否则继续进行下一步骤。

步骤 9 更新所有 $X_D^{(n)} \cap \bar{D}$ 的速率。

步骤 10 判断如果 $R_d \geq \zeta_D, d \in X_D^{(n)} \cap \bar{D}$, 更新 $D' = D' \cup \{d\}, \bar{D} = \bar{D} \setminus \{d\}, \bar{N} = \bar{N} \setminus \{n\}$, 转至步骤 2。

步骤 11 关于资源块集合 \bar{N} 生成用户间吞吐量结合矩阵 $R = \{R_{u,d}^{(n)}\}_{(K+D) \cdot (D+1) \cdot |\bar{N}|}$ 。

步骤 12 根据式(12)选择出本次需要分配的资源块 n 和其相对应的用户。如果 $m_U \in \kappa$ 且 $m_D = D+1$, 则把资源块 n 单独分配给蜂窝用户 m_U , 更新 $X_C^{(n)} = \{m_U\}$, 转至步骤 17; 如果 $m_U = m_D$, 则把该资源块 n 单独分配给 D2D 用户 m_D , 更新 $X_D^{(n)} = \{m_D\}$, 转至步骤 17; 如果 $m_U \in \kappa$ 且 $m_D \in D$, 则把资源块 n 分配给蜂窝用户 m_U 和 D2D 用户 m_D , 更新 $X_C^{(n)} = \{m_U\}, X_D^{(n)} = \{m_D\}$; 否则把资源块 n 分配给 D2D 用户 m_U 和 m_D , 更新 $X_D^{(n)} = \{m_U, m_D\}$ 。

步骤 13 在高优先级的 D2D 用户集中根据式(15)选择加入使用资源块 n 的 D2D 用户 m_D 。

步骤 14 如果 $\Delta R^{(n)}(m_D) > 0$, 更新使用资源块 n 的 D2D 用户集合 $X_D^{(n)} = X_D^{(n)} \cup \{m_D\}$, 转至步骤 13; 否则继续下一步骤。

步骤 15 在低优先级的 D2D 用户集中根据式(15)选择加入使用资源块 n 的 D2D 用户 m_D 。

步骤 16 如果 $\Delta R^{(n)}(m_D) > 0$, 更新使用资源块 n 的 D2D 用户集合 $X_D^{(n)} = X_D^{(n)} \cup \{m_D\}$, 转至步骤 15; 否则继续进行下一步骤。

步骤 17 更新所有 $X_D^{(n)} \cap \bar{D}$ 的速率。

步骤 18 判断如果 $R_d \geq \zeta_D, d \in X_D^{(n)} \cap \bar{D}$, 更新 $D' = D' \cup \{d\}, \bar{D} = \bar{D} \setminus \{d\}, \bar{N} = \bar{N} \setminus \{n\}$; 否则 $\bar{N} = \bar{N} \setminus \{n\}$ 。

步骤 19 判断如果 $|\bar{N}| \neq \emptyset$, 转至步骤 11; 否则结束算法, 输出蜂窝用户与 D2D 用户的资源块分配结果。

3 功率分配

功率分配问题在资源块分配结束后仍是一个非线性优化问题,用传统方法求解计算复杂度大,因此采用一种改进的粒子群算法来求解功率分配的问题。

粒子群算法从随机解出发,通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优,其进化公式为:

$$\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{v}_i(t-1) + \varphi_1 \cdot r_1 \cdot (\mathbf{P}_{\text{best}_i} - \mathbf{x}_i(t-1)) + \varphi_2 \cdot r_2 \cdot (\mathbf{G}_{\text{best}} - \mathbf{x}_i(t-1)) \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_i(t-1) + \mathbf{v}_i(t) \quad (17)$$

根据上述资源分配模型,对粒子 \mathbf{x}_i 的位置定义为:

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i|X^{(1)}|}, x_{i(|X^{(1)}|+1)}, \dots, x_{i(|X^{(1)}|+|X^{(2)}|)}, \dots, x_{i(|X^{(1)}|+|X^{(2)}|+|X^{(n)}|+1)}, \dots, x_{i(|X^{(1)}|+|X^{(2)}|+\dots+|X^{(n)}|)}) \quad (18)$$

\mathbf{x}_i 是一个 $\sum_{n=1}^N |X^{(n)}|$ 维向量,对应表示使用每个资源块的蜂窝用户和 D2D 用户的发射功率; \mathbf{v}_i 表示第 i 个粒子的速度; $\mathbf{P}_{\text{best}_i}$ 表示粒子 i 在当前时刻的最好位置; \mathbf{G}_{best} 表示粒子群在当前时刻的最好位置; φ_1 和 φ_2 为大于 0 的常数; r_1 和 r_2 是 0~1 范围内的随机数。原始粒子群算法处理的是无约束条件的问题,并且存在容易收敛到局部最优解的问题^[11],为了有效地解决上述功率分配问题,对粒子群算法进行了一些改进。

假设优化问题中的第 j 个不等式约束条件是 $g_j(\mathbf{x}_i) \geq 0$,则粒子 \mathbf{x}_i 对第 j 个约束条件的违反程度定义为 $G_j(\mathbf{x}_i) = |\min\{0, g_j(\mathbf{x}_i)\}|$ 。当 $G_j(\mathbf{x}_i) = 0$ 时表示粒子 \mathbf{x}_i 在第 j 个约束条件的可行范围内,否则其不满足第 j 个不等式约束条件,并且其值越大,表示粒子 \mathbf{x}_i 偏离第 j 个约束条件构成的可行域范围越大。因此,粒子 \mathbf{x}_i 违反优化问题中全部约束条件的程度表示为 $Vio(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^J G_j(\mathbf{x}_i)$,若粒子 \mathbf{x}_i 满足全部约束条件,则 $Vio(\mathbf{x}_i) = 0$ 。

根据上述对违反约束条件的分析,针对本文功率分配优化问题中的约束条件可得到相对应的违反程度结果。粒子 \mathbf{x}_i 违反 K 个蜂窝用户最小速率需求的程度为 $\sum_{k=1}^K |\min(0, (R_k - \zeta_c))|$;粒子 \mathbf{x}_i 违反 D 对 D2D 用户最小速率需求的程度为 $\sum_{d=1}^D |\min(0, (R_d - \zeta_d))|$;粒子 \mathbf{x}_i 违反 K 个蜂窝用户最大发射功率限制的程度为 $\sum_{k=1}^K |\min(0, (P_c - \sum_{n=1}^N P_k^{(n)}))|$;粒子 \mathbf{x}_i 违反 D 对 D2D 用户最大发射功率限制的程度

为 $\sum_{d=1}^D |\min(0, (P_d - \sum_{n=1}^N P_d^{(n)}))|$ 。则粒子 \mathbf{x}_i 违反功率分配优化问题中全部约束条件的程度表示为:

$$Vio(\mathbf{x}_i) = \sum_{k=1}^K |\min(0, (R_k - \zeta_c))| + \sum_{d=1}^D |\min(0, (R_d - \zeta_d))| + \sum_{k=1}^K |\min(0, (P_c - \sum_{n=1}^N P_k^{(n)}))| + \sum_{d=1}^D |\min(0, (P_d - \sum_{n=1}^N P_d^{(n)}))| \quad (19)$$

粒子群算法通过向其他粒子的学习来逐渐靠近全局最优位置,因此在全局最优粒子附近的粒子对于群体向最优位置收敛有非常积极的作用,即使该粒子是不可行解。鉴于上述的分析,本文参考文献[12]采用直接比较粒子优劣的方法来处理约束条件,粒子间的比较准则为:

1) 当粒子 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 都是可行解时,直接比较 2 个粒子的目标函数值的大小,函数值大的粒子占优。

2) 当粒子 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 都是不可行解时,比较粒子各自违反约束的程度大小,即 $Vio(\mathbf{x}_i)$ 和 $Vio(\mathbf{x}_j)$,违反程度值小的粒子占优。

3) 当粒子 \mathbf{x}_i 是可行解但 \mathbf{x}_j 是不可行解时,先比较粒子 \mathbf{x}_i 和粒子 \mathbf{x}_j 到粒子群最优粒子的欧式距离 $d_g(i)$ 和 $d_g(j)$ 的大小。若 $d_g(i) > d_g(j)$,则比较 2 个粒子的目标函数值的大小,函数值大的粒子占优,否则可行解的粒子 \mathbf{x}_i 占优。

为了解决粒子群算法在后期迭代中由于种群多样性下降容易收敛到局部最优解的问题^[13],本文采用了种群随机变异的策略来增加种群的多样性。定义

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^M \sqrt{\sum_{n=1}^N |X^{(n)}| \sum_{m=1}^M (x_i^m - \bar{p}_m)^2}}{M} \quad \text{为种群多样性值, } M \text{ 为}$$

种群大小, x_i^m 为粒子 i 的第 m 维坐标值, \bar{p}_m 为种群所有粒子的第 m 维坐标平均值。当 $\lambda \leq C$ 的时候,对当前的群体最优粒子进行随机扰动,随机扰动的公式如下^[14]:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + S \cdot \frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} \cdot \mathbf{x}_i \quad (20)$$

其中, S 为服从标准正态分布的随机变量。

综合以上改进的粒子群算法,功率分配的具体步骤为:

步骤 1 初始化种群规模 M , 每个粒子的维度为 $W = \sum_{n=1}^N |X^{(n)}|$, 最大迭代次数为 t_{\max} , 并设置 $t = 1$ 。随机生成 M 个 W 维的粒子, 初始位置为 $\mathbf{x}_i(0)$, 初始速度为 $\mathbf{v}_i(0)$, $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

步骤 2 将每个粒子的当前位置设置为各自的 P_{best} , 种群的最优粒子 G_{best} 根据粒子比较准则找到。

步骤 3 判断迭代次数是否达到最大值, 若是则转至步骤 7, 否则继续步骤 4。

步骤 4 根据进化方程更新种群中粒子的位置和速度。

步骤 5 根据粒子间的比较准则更新 P_{best} 和 G_{best} 。

步骤 6 判断种群多样性值是否小于门限值, 若小于则对当前最优粒子进行随机扰动, 否则执行步骤 3。

步骤 7 算法停止, 输出 G_{best} , 将其转化为对应用户的发射功率。

4 仿真分析

仿真模型为单小区蜂窝系统, 蜂窝用户和 D2D 用户的发送端在小区中随机分布, D2D 用户的接收端在以相对应的 D2D 发送端为圆心、 r 为半径的圆内随机分布, 对比算法 1 为参考文献[15]中的资源分配算法, 对比算法 2 为参考文献[9]中的资源分配算法。具体仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

仿真参数	值
系统带宽/MHz	3
资源块带宽/kHz	180
资源块个数	15
蜂窝用户数	10
D2D 用户数	2 ~ 20
蜂窝用户最大发射功率/dBm	24
D2D 用户最大发射功率/dBm	21
D2D 对收发端最大距离/m	20
蜂窝路损模型/lgd	$128.1 + 37.65$
D2D 路损模型/lgd	$148 + 40$
噪声功率谱密度/(dBm · Hz ⁻¹)	-174
小尺度衰落	瑞利衰落
蜂窝用户最小速率/(Mb · s ⁻¹)	0.8
D2D 用户最小速率/(Mb · s ⁻¹)	0.8

图 1 为 D2D 用户对数在 2 ~ 20 间系统总吞吐量的图形。可以看到, 随着 D2D 用户数的增大, 4 种算法的系统吞吐量均有所提高, 本文算法是靠近穷举搜索最优算法的, 在任何 D2D 用户对数情况下都比 2 个对比算法的吞吐量大。这是因为本文算法可以在满足蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量的前提下根据不同的用户模式比例和干扰情况自适应地调整资源的使用情况, 更合理、充分地利用资源。而对比算法 1 在任何情况下只允许 D2D

用户复用一個资源块并且蜂窝用户的资源只允许一个 D2D 用户复用, 限制了 D2D 用户吞吐量的提升, 所以系统总吞吐量较本文算法有明显的差距。对比算法 2 虽然允许多个 D2D 用户复用同一个蜂窝用户的资源, 但是其使用的是固定的发射功率, 其综合结果导致系统总吞吐量最低。随着 D2D 用户数的增大, 本文算法获得的吞吐量增益逐渐增大。

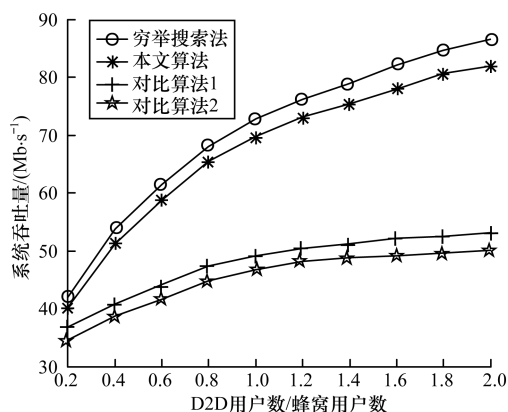


图 1 系统总吞吐量

图 2 为 D2D 用户对数在 2 ~ 20 间 D2D 用户的接入率图形。可以看到, 本文算法的接入率一直保持在比较高的水平, 靠近穷举搜索法的接入率, 而对比算法 1 随着 D2D 用户数的增大, 接入率越来越差, 特别是在 D2D 用户数大于蜂窝用户数的情况下接入率明显下降。这是因为对比算法 1 限制了 D2D 用户资源块的使用, 随着 D2D 用户比例的增大, 能够复用蜂窝用户资源的 D2D 用户达到了饱和, 因此接入率发生明显下降。对比算法 2 的接入率没有明显的下降, 但是其与本文算法的接入率仍有一定差距, 这是因为其对资源的使用仍有限制, 并且未对功率进行最优分配, 加大了用户间的干扰, 损失了一部分的 D2D 用户接入。

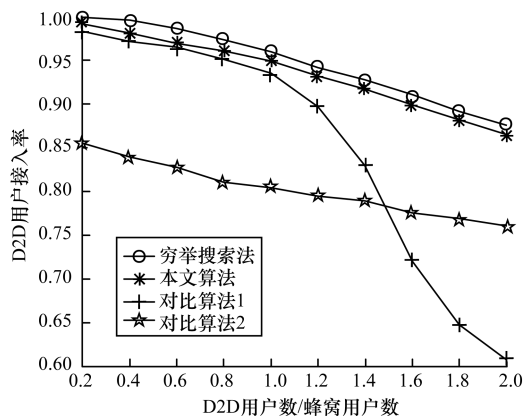


图 2 D2D 用户接入率

5 结束语

针对随着用户模式的变化现有资源分配方案不能自适应调整的问题,本文提出一种自适应地调整使用每个资源块的用户个数以及D2D模式用户可使用资源块个数的资源分配方案,将其建模为最大化系统吞吐量的优化问题,针对该优化模型提出一种两阶段的资源分配算法。资源块分配阶段自适应地调整用户使用资源的情况,功率分配阶段根据资源块的分配结果利用改进的粒子群算法调整发射功率使系统吞吐量最大化。仿真结果表明,在保证蜂窝用户和D2D用户的服务质量的同时,本文算法能够获得更高的系统吞吐量和D2D用户接入率,更好地适应了用户模式变化引起的网络环境变化。

参考文献

- [1] LEI L, ZHONG Z D, LIN C, et al. Operator Controlled Device-to-device Communication in LTE-advanced Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 96-104.
- [2] FODOR G. Design Aspects of Network Assisted Device-to-device Communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 170-177.
- [3] CHEN X, HU R Q, QIAN Y. Distributed Resource and Power Allocation for Device-to-device Communications Underlying Cellular Networks [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. San Antonio, USA; [s. n.], 2014: 4947-4952.
- [4] MIN H, LEE J, PARK S, et al. Capacity Enhancement Using an Interference Limited Area for Device-to-device Uplink Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 3995-4000.
- [5] ALI S, RAJATHEVA N, LATVA-AHO M. Full Duplex Device-to-device Communication in Cellular Networks [C]//Proceedings of European Conference on Networks and Communications. Athens, Greece; IEEE Press, 2014: 1-5.
- [6] LI Y, JIN D, YUAN J, et al. Coalitional Games for Resource Allocation in the Device-to-device Uplink Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 3965-3977.
- [7] 杨阳, 廖学文, 高贞贞, 等. 多小区终端直通异构网络中利用图论的资源分配方案 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 10(9): 22-28.
- [8] YIN R, ZHONG Caijun, YU Guanding. Joint Spectrum and Power Allocation for D2D Communications Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2182-2195.
- [9] SUN H, SHENG M, WANG X. Resource Allocation for Maximizing the Device-to-device Communications Underlying LTE-advanced Networks [C]//Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China Workshops. Xian, China; IEEE Press, 2013: 60-64.
- [10] 程永生, 朱江, 林孝康. 引入D2D通信的蜂窝网上行资源分配算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2822-2827.
- [11] 纪雪玲, 李明, 李玮. 一种克服局部最优的收缩因子PSO算法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(20): 213-215.
- [12] 刘衍民, 隋常玲, 牛奔. 解决约束优化问题的改进粒子群算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 23-26.
- [13] ANDREWS P S. An Investigation into Mutation Operators for Particle Swarm Optimization [C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver, Canada; [s. n.], 2006: 3789-3796.
- [14] 孙沛然, 王可人, 冯辉. 改进粒子群算法在频谱功率分配中的应用 [J]. 电讯技术, 2016, 56(7): 788-793.
- [15] DAGUAN F, LU L, YI Y W. Device-to-device Communications Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.

编辑 任吉慧

(上接第106页)

- [9] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [10] 李君, 叶兰兰, 金宁, 等. OFDMA系统中容量最大化的资源分配算法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(6): 49-52.
- [11] WANG R, LAU V K N, LV L, et al. Joint Cross-layer Scheduling and Spectrum Sensing for OFDMA Cognitive Radio Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2410-2416.
- [12] YU W, LUI R. Dual Methods for Nonconvex Spectrum Optimization of Multicarrier Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7): 1310-1322.
- [13] BISIO I, MARCHESE M. Power Saving Bandwidth Allocation over GEO Satellite Networks [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 596-599.
- [14] MARQUES A G, WANG X, GIANNAKIS G B. Dynamic Resource Management for Cognitive Radios Using Limited-rate Feedback [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(9): 3651-3666.
- [15] FILIK U B, KURBAN M. Feasible Modified Subgradient Method for Solving the Thermal Unit Commitment Problem as a New Approach [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2010(4): 242-256.

编辑 张帆