

DOI: 10.7652/xjtuxb201410004

多小区终端直通异构网络中 利用图论的资源分配方案

杨阳, 廖学文, 高贞贞, 吕刚明
(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对在终端直通(device-to-device, D2D)用户与蜂窝用户共存的上行多小区系统中存在严重的小区内以及小区间干扰问题,提出了一种基于干扰图和最佳二分图匹配的多小区资源分配方案,以获得网络容量提升。该方案根据上行链路的传输特性获得 D2D 用户与蜂窝用户之间带权值的无向干扰图,根据干扰图将互干扰较大的用户分到不同的用户簇中,不同的用户簇占用不同的子载波,并利用匈牙利算法对资源块进行分配。仿真结果表明,所提出的方案以较低复杂度接近遍历最优算法,并且与部分频率复用方案比较,所提方案的系统容量提升了 19.78%。

关键词: 终端直通;异构网络;资源分配;图论

中图分类号: TN914.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0022-07

A Resource Allocation Scheme Using Graph Theory for D2D Communication in Multi-Cell Heterogeneous Cellular Networks

YANG Yang, LIAO Xuewen, GAO Zhenzhen, LÜ Gangming
(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A multi-cell resource allocation scheme based on interference graph and the best binary map matching is proposed to deal with the serious intra-cell and inter-cell interference in multi-cell uplink D2D (Device-to-Device) communication underlaying cellular system. An undirected and weighted interference graph is firstly obtained from the interference characteristics between D2D users and cellular users. Then the interference graph is used to assign users with a larger mutual interference to different clusters and the Hungarian algorithm is employed to allocate these clusters into different subcarriers. Simulation results show that the performance of the proposed scheme is close to that of the exhaustive search scheme, but its complexity is much lower. Moreover, comparisons with the FFR show that the proposed scheme improves the entire system capacity by 19.78%.

Keywords: device-to-device; heterogeneous network; resource allocation; graph theory

随着终端直通(device-to-device, D2D)技术在移动蜂窝通信网络中的应用,由 D2D 用户复用蜂窝用户的资源而引起的干扰以及频谱资源共享所引起

的小区间干扰,已经成为影响 D2D 用户与蜂窝用户共存的多小区系统性能的最主要因素^[1-2]。为了减少 D2D 用户复用部分蜂窝用户资源而产生的干扰,

文献[3-6]分别提出基于匈牙利算法、干扰限制环(interference limited ring, ILR)、图论和模式选择的单小区资源分配方案,有效地减少了 D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰。文献[7]提出单小区中支持单 D2D 对复用多个蜂窝用户资源的资源调度算法。但是,单小区系统中只存在蜂窝用户与 D2D 用户之间的干扰,文献[3-7]的资源分配方案不能拓展到 D2D 用户与蜂窝用户共存的多小区模型。为了减少多小区 OFDMA 系统中小区间干扰的问题,文献[8-9]提出利用图论工具来解决干扰协调问题方案。但是,由于 D2D 用户复用部分蜂窝用户的资源,因此多小区蜂窝用户以及 D2D 用户共存的系统的干扰图不同于多小区 OFDMA 中的干扰图,文献[7-8]的模型不能适用于多小区 D2D 模型。

为了解决 D2D 用户与蜂窝用户共存的多小区系统中的小区间干扰的问题,文献[10]结合经典的部分频率复用(fractional frequency reuse, FFR)技术,对边缘的蜂窝用户以及 D2D 用户分别分配正交的频谱资源以提高系统容量。但是,FFR 方案的频谱利用率较低。因此,我们需要寻找一种能够降低蜂窝用户的小区间干扰以及 D2D 用户与蜂窝用户之间干扰,同时提高系统频谱利用率的资源分配方案。

基于上述分析,本文提出一种蜂窝用户以及 D2D 用户共存的多小区场景下次优的资源分配方案。该方案考虑到上行链路 D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰以及小区间干扰,基于图论理论得到 D2D 用户以及蜂窝用户共存的干扰图,根据带权值的干扰图对所有用户进行分簇,最后利用组合优化的最佳二分图匹配对用户簇进行资源分配。仿真结果表明,相比基于 FFR 算法的方案,本文的方案提高了系统的总容量,且系统性能接近最优遍历算法。

1 系统模型

图 1 描述了一个多小区上行多蜂窝用户与 D2D 用户共存的系统。假设系统模型包括 N 个小区,每个小区包含 M 个蜂窝用户(CU)以及 L 个 D2D 用户(D^t 为发射端用户, D^r 为接收端用户),蜂窝用户以及 D2D 用户都是随机分布在整個小区内,并且每个小区的资源块数量相等且为 K 。D2D 用户只能复用一个蜂窝用户的资源。

设 $x_{n,l,k}^D, y_{n,m,k}^C \in \{0,1\}$, 分别表示第 n 个小区内 D2D 用户与蜂窝用户资源分配的指示变量,则有

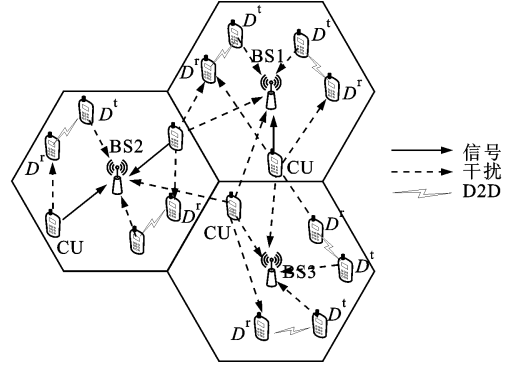


图 1 多小区上行链路干扰模型

$$x_{n,l,k}^D = \begin{cases} 1, & \text{第 } n \text{ 个小区内第 } l \text{ 个} \\ & \text{D2D 用户复用资源 } k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{n,m,k}^C = \begin{cases} 1, & \text{第 } n \text{ 个小区内第 } m \text{ 个} \\ & \text{蜂窝用户占用资源 } k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n=1,2,\dots,N$ 表示小区序号; $k=1,2,\dots,K$ 表示资源块的序号; $m=1,2,\dots,M$ 表示蜂窝用户的序号; $l=1,2,\dots,L$ 表示 D2D 用户的序号。

复用上行频谱资源时,给同一个小区内的 D2D 用户分配正交的资源^[10], D2D 接收端 $D_{n,l}^r$ 接收到的信号包括 D2D 链路中 D2D 发射端 $D_{n,l}^t$ 发射的有用信号、蜂窝用户对 $D_{n,l}^r$ 的干扰信号以及邻小区 D2D 用户的发射端 D_{n^*,l^*}^t 对 $D_{n,l}^r$ 的干扰信号。第 n 个小区内第 l 个 D2D 与蜂窝用户共享资源 k 时, $D_{n,l}^r$ 接收的信号为

$$y_{n,l,k}^D = x_{n,l,k}^D (p^D g_{n,l}^D)^{1/2} s_{n,l}^D + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_{n,m,k}^C (p_{n,m}^C g_{n,l}^{CD})^{1/2} s_n^C + \sum_{\substack{n^*=1 \\ n^* \neq n}}^N \sum_{\substack{l^*=1 \\ l^* \neq l}}^L x_{n^*,l^*,k}^{D^*} (p^D g_{n,n^*}^{DD^*})^{1/2} s_{n^*,l^*}^{DD^*} + n_k \quad (3)$$

式中: p^D 表示 D2D 用户的发射功率(假设所有 D2D 用户的发射功率相等); $p_{n,m}^C$ 表示第 n 个小区内第 m 个蜂窝用户的发射功率,其值小于等于蜂窝用户最大发射功率 $p^{C,\text{MAX}}$ (假设上行链路采用功率控制,使基站处接收到蜂窝用户信号的平均功率相等); $g_{n,l}^D$ 、 $g_{n,l}^{CD}$ 分别表示第 n 个小区内 $D_{n,l}^r$ 与 $D_{n,l}^t$ 之间的信道增益以及蜂窝用户到 D2D 接收端 $D_{n,l}^r$ 之间的信道增益; $g_{n,n^*}^{DD^*}$ 表示邻小区 n^* 中第 l^* 个 D2D 用户发射端 D_{n^*,l^*}^t 与本小区 n 中第 l 个 D2D 用户接收端 $D_{n,l}^r$ 的信道增益; n_k 表示加性高斯白噪声。

根据式(3)可以得到 D2D 接收端 D^r 的信干噪比(SINR)

$$\gamma_{n,l,k}^{\text{D,SINR}} = \frac{x_{n,l,k}^{\text{D}} p_{n,l,k}^{\text{D}} g_{n,l}^{\text{D}}}{\sum_{n^*=1, n^* \neq n}^N \sum_{m=1}^M y_{n^*,m,k}^{\text{C}} p_{n^*,m,k}^{\text{C}} g_{n^*,m,k}^{\text{CD}} + \sum_{n^*=1, n^* \neq n}^N \sum_{l^*=1}^L x_{n^*,l^*,k}^{\text{D}} p_{n^*,l^*,k}^{\text{D}} g_{n^*,l^*,k}^{\text{DD}} + N_0} \quad (4)$$

同理,可以得到上行链路基站处的 SINR

$$\gamma_{n,m,k}^{\text{C,SINR}} = \frac{y_{n,m,k}^{\text{C}} p_{n,m,k}^{\text{C}} g_{n,m,k}^{\text{C}}}{\sum_{n^*=1, n^* \neq n}^N \sum_{m^*=1}^M y_{n^*,m^*,k}^{\text{C}} p_{n^*,m^*,k}^{\text{C}} g_{n^*,m^*,k}^{\text{C}} + \sum_{n^*=1}^N \sum_{l^*=1}^L x_{n^*,l^*,k}^{\text{D}} p_{n^*,l^*,k}^{\text{D}} g_{n^*,l^*,k}^{\text{DC}} + N_0} \quad (5)$$

根据香农公式,得到 D2D 用户单位带宽的容量

$$r_{n,l,k}^{\text{D}} = \log(1 + \gamma_{n,l,k}^{\text{D,SINR}}) \quad (6)$$

同理,可以得到蜂窝用户单位带宽的容量

$$r_{n,m,k}^{\text{C}} = \log(1 + \gamma_{n,m,k}^{\text{C,SINR}}) \quad (7)$$

综上,以最大化整个系统用户容量之和为优化目标,包括所有 D2D 用户容量以及所有蜂窝用户的容量,该优化问题可建模为如下优化问题

$$\begin{aligned} \max_{x_{n,l,k}^{\text{D}}, y_{n,m,k}^{\text{C}}} & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{n,l,k}^{\text{D}} + \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K r_{n,m,k}^{\text{C}} \\ \text{s. t.} & \begin{cases} x_{n,l,k}^{\text{D}}, y_{n,m,k}^{\text{C}} \in \{0,1\} \\ \sum_{l=1}^L x_{n,l,k}^{\text{D}} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K x_{n,l,k}^{\text{D}} \leq 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K y_{n,m,k}^{\text{C}} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{m=1}^M y_{n,m,k}^{\text{C}} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:目标函数后的 5 个公式表示资源分配的约束条件,第 2 和第 3 条件约束 D2D 用户只能与蜂窝用户共享一个资源块,第 4 和第 5 条件约束一个蜂窝用户只能占用一个资源块,并且一个资源块只能分给一个蜂窝用户。

在此多小区模型中,每个小区存在多个 D2D 对时仅增加了信号表示以及干扰图的复杂度,并不会改变干扰问题的实质。为了表述简单并方便读者理解,故下文中将每小区 D2D 对简化为 $L=1$,则式(8)可以简化为

$$\max_{x_{n,l,k}^{\text{D}}, y_{n,m,k}^{\text{C}}} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K r_{n,l,k}^{\text{D}} + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{n,m,k}^{\text{C}}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} x_{n,l,k}^{\text{D}}, y_{n,m,k}^{\text{C}} \in \{0,1\} \\ \sum_{k=1}^K x_{n,l,k}^{\text{D}} \leq 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K y_{n,m,k}^{\text{C}} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{m=1}^M y_{n,m,k}^{\text{C}} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

优化问题式(9)是一个非线性整数规划问题。遍历搜索算法是求得最优载波分配方案的最优算法,但是遍历算法复杂度较大,其运算复杂度阶数为 $O(K^{NM+N})$,故而遍历算法在实际应用中不可行。因此,本文以获得降复杂度的次优资源分配方案为目标,利用图论理论来进行蜂窝用户以及 D2D 用户的资源分配。

2 基于图论的资源分配方案

在图论理论中,利用抽象图中节点和边来反映实际网络中的具体事物之间的相互关系。根据多小区 D2D 用户与蜂窝用户共存的干扰特征,得到 D2D 用户与蜂窝用户的干扰图。假设每个用户为一个节点 V ,连接各个节点之间的连接线称为图的边 E ,对于每条边都赋予一个实数称为每条边的权值 ω ,则图表示为 $G=(V,E)$,其中 $V=\{D,C\}$, D 表示 D2D 用户节点集合, $D=\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, C 表示蜂窝用户节点集合, $C=\{C_1, C_2, \dots, C_{N^*M}\}$ 。利用相连 2 个节点之间同频复用时的互干扰值之和作为该边的权值 $\omega_{p,q}=I_{p,q}+I_{q,p}$, $p,q \in V$; $I_{p,q}$ 、 $I_{q,p}$ 分别表示节点 p 对 q 的干扰及节点 q 对 p 的干扰。根据上述分析以及式(8)的优化问题,本文的资源分配方案可分为权值计算、用户分组以及用户簇的资源分配 3 个步骤。

2.1 权值计算

假设基站 BS 可以获取蜂窝用户到基站的信道状态信息以及蜂窝用户与 D2D 用户之间的信道状态信息。当频率复用系数为 1 的时候,可以得到每条边的权值。计算每条边的权值时,按照以下假设进行:

假设 1 同一个小区内蜂窝用户节点之间直接连线,其权值为无穷大;

假设 2 相对于其他干扰,D2D 用户对蜂窝用户的干扰可以忽略不计;

假设 3 小区边缘蜂窝用户对距离较近的一个或者 2 个邻小区中同频边缘蜂窝用户产生干扰,对邻小区同频中心蜂窝用户无干扰;

假设 4 小区中心蜂窝用户对邻小区同频蜂窝用户

无干扰。

在上行链路中,蜂窝用户与基站之间直接通信,蜂窝用户之间不直接通信,为了简化蜂窝用户的干扰图假设蜂窝用户之间直接连线。同时,为了满足式(9)中的约束条件 3 与 4,给同一个小区内的蜂窝用户分配不同载波假设同一个小区内蜂窝用户的权值为无穷大。假设 2 中,D2D 用户对蜂窝用户的干扰其实是对蜂窝用户所服务基站的干扰,由于 D2D 用户对距离较近,发射功率较小,相对于其他干扰,可以忽略不计。

假设 3 和假设 4 中,根据用户距离服务小区基站的位置 d ,判断小区边缘用户以及小区中心用户。若用户距离基站的位置 d 小于该小区半径 R_{BS} 的 α 倍时,即 $d < \alpha R_{BS}$ ($0 < \alpha < 1$),则该用户为小区中心用户,否则为小区边缘用户^[4]。由于本小区的中心用户与邻小区的中心用户以及边缘用户相距较远,则忽略本小区中心用户与邻小区所有用户之间的干扰。根据小区边缘用户位置的不同,小区边缘用户的干扰只考虑对距离较近的一个或者 2 个邻小区中同频边缘用户对其的干扰。以图 2 所示的 3 个小区模型为例进一步说明假设 4。

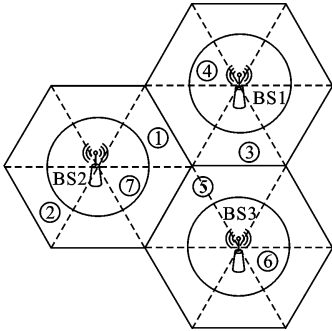


图 2 3 个小区的模型图

将每个小区的边缘区域根据邻小区的位置划分为 6 个区域,分析所有的用户共享同一个子载波时小区间干扰问题。蜂窝用户 4 和 6 为小区中心用户,与邻小区同频蜂窝用户无干扰。根据边缘用户所处不同区域,判断边缘蜂窝用户 1、2、3 和 5 的对邻小区同频边缘用户的干扰。用户 1 的对邻小区 BS1 的同频边缘用户产生干扰,用户 3 对邻小区 BS3 的同频边缘用户产生干扰,用户 5 对邻小区 BS1 和 BS2 的同频边缘用户产生干扰,而用户 2 对邻小区无干扰。由于 D2D 用户复用蜂窝用户的资源,则所有的蜂窝用户对用户 7 产生干扰。通过上述分析,得到如图 3 所示的 D2D 用户与蜂窝用户共存的无向干扰图。

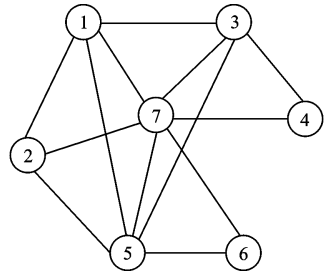


图 3 基于图论的蜂窝用户与 D2D 用户的干扰图

根据以上 4 个假设,得到多小区下 D2D 用户与蜂窝用户之间的权值,同时也可以得到 D2D 用户与蜂窝用户共存的无向干扰图,利用干扰图进行用户分组及载波分配。

2.2 用户分组

由于每个小区的蜂窝数为 M ,D2D 用户数为 1,则整个系统总共有 $S = N(M+1)$ 个用户,且每个小区的资源块总数为 K 。当用户数 S 较少时,可根据简单着色方法来分配 K 个资源块。但是,当 S 较大时,着色法难以提供有效的资源分配方案。本文根据上述得到的干扰图对所有的用户分组,简化 S 较大时载波的分配。在这种情况下,用户分组问题近似于 K -Cut 问题,该问题的数学模型可描述为:

P1:将 $S = N(M+1)$ 个用户分为 K 个用户簇 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$),保证 $\bigcup_{i=1}^K U_i = S$,且使得

$$\sum_{a \in U_i, b \in U_j, i \neq j} \omega_{a,b} \text{ 最大化。}$$

本文参考文献[11]提出一种解决 P1 问题的算法。该算法流程如图 4 所示,具体步骤如下:

(1)初始化 K 个用户簇集合 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 为空集 $\emptyset$,每个用户簇的权值为 $W_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, K$);

(2)挑选权值最大的 K 个用户分别分配到 K 个用户簇 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 中,且每个用户簇 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 中只有一个用户,即当 $M = K$ 时,选取一个小区中所有的蜂窝用户分别分配到 K 个用户簇中;当 $M < K$ 时,先选取一个小区中 M 个用户分别分配到 M 个用户簇中,再从剩余用户中选取权值最大的 $K - M$ 个用户分到剩余的用户簇中;

(3)选取剩下的用户节点分别分配到各个用户簇 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 中,使得 K 个用户簇之间的权值和是最大的,即把用户之间干扰较小的分配到一个用户簇 U_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 中,而权值比较大的节点分配到不同的用户簇中;

(4)重复上述工作,直到所有的节点分配完毕。

通过上述步骤,将 S 个用户分至 K 个用户簇

$U_i (i=1, 2, \dots, K)$ 中, 把 S 个用户的资源优化问题简化为 K 个用户簇分配 K 个载波的问题, 并且用户分组的算法复杂度为 $O(KN(M+1))$ 。通过用户分簇, 可以把干扰严重的用户分到不同的簇中, 干扰较小的用户分到同一个簇中, 通过 K 个用户簇之间的载波资源分配, 减少了小区间及小区内干扰。

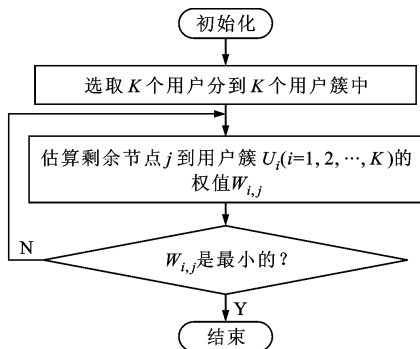


图4 用户分组流程图

2.3 用户簇资源分配

每个用户簇 $U_i (i=1, 2, \dots, K)$ 内的用户使用同一个资源块, 且不同的用户簇使用不同的资源块, 第 i 个用户簇占用第 j 个资源块的吞吐量为 $T_{i,j}$ (通过容量公式计算)。在权值计算以及用户分组的基础上, 式(9)的优化问题简化为 K 个资源块分配到 K 个用户簇 $U_i (i=1, 2, \dots, K)$ 中, 且每个用户簇中至少含有一个用户。该问题近似于组合优化中二分图匹配, 则最终载波资源分配问题可以简化为数学问题 P2。

P2: 二分图 $G_2 = (U, R; E)$, 其中 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_K\}$ 表示 K 个用户簇, $R = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ 表示 K 个资源块, $T_{i,j}$ 为连接两个子图的边 E 的权值, 根据权值矩阵即吞吐量矩阵 $T = [T_{i,j}]_{K \times K}$, 寻找二分图 $G_2 = (U, Y; E)$ 的最佳匹配方法。

在 P2 中寻找二分图 $G_2 = (U, R; E)$ 的最佳匹配方法就是对每个用户簇分配资源块, 使得整个用户簇的吞吐量达到最佳。在二分图 G_2 众多匹配方法中, 最佳的匹配方法是匈牙利算法^[12]。该算法流程如图 5 所示, 具体的步骤如下。

(1) 将吞吐量矩阵 $T = [T_{i,j}]_{K \times K}$ 的每行、每列各元素都依次减去该行、该列的最小元素, 使每行、每列都至少出现一个 0 元素, 构成等价吞吐量矩阵 T' , 则以 T' 为吞吐量矩阵的分配问题与原问题有相同的最优解。

(2) 寻找独立 0 元素。 T' 中的每行和每列都至少含有一个 0 元素, 位于不同行不同列的 0 元素称为独立的 0 元素。若能找出不同行不同列的 n 个独

立 0 元素, 则进行第 4 步, 否则进行第 3 步。

(3) 调整效益矩阵。在 T' 中未含有独立 0 元素的数集 D 中, 找出最小的数 d , 数集 D 中所有数都减去 d , 组成新的等价吞吐量矩阵仍叫 T' , 返回第 2 步。

(4) 令独立 0 元素对应的位置 (i, j) 处 $X_{i,j} = 1$, 其余位置 $X_{i,j} = 0$ 。

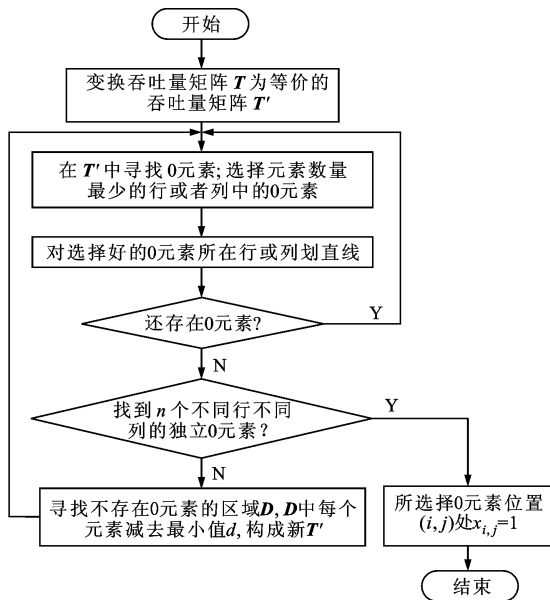


图5 匈牙利算法流程图

通过上述步骤可以得到矩阵 $X = [X_{i,j}]_{K \times K}$ 为最优的资源分配方案, 其中 $X_{i,j} = 1$ 表示第 i 个用户簇占用第 j 个资源块。在最优资源分配方案下, 系统总的吞吐量为吞吐量矩阵 $T = [T_{i,j}]_{K \times K}$ 中使 $X_{i,j} = 1$ 位置的各元素和, 即 $\text{sum}(TX)$ 。通过以上权值计算、用户分组以及用户簇资源分配 3 个步骤得到一种资源分配方案, 该方案的复杂度为 $O(KN(M+1)+K)$, 与遍历算法相比大大降低了计算复杂度。

3 仿真结果与分析

本节进行系统仿真来验证算法性能, 并与遍历最优方案以及 FFR 分配方案进行对比。本节中的信道增益包括瑞利分布的小尺度衰落以及路径损耗。蜂窝链路的路径损耗为 $128.1 + 37.6 \lg(d)$, D2D 链路的损耗为 $148 + 40 \lg(d)$, 其中 d 为用户发射端与接收端之间的距离, 单位为 km。仿真参数如表 1 所示。

图 6 表明蜂窝用户数 M 发生变化时, 不同资源分配方案下整个系统吞吐量的性能。可以看出, 随着蜂窝用户数的增加, 整个系统的吞吐量也随着增大。遍历最优是穷举所有分配可能性, 寻找最大的吞

表 1 仿真参数

仿真参数	仿真值
小区数量	7
小区半径/m	500
α	2/3
带宽/MHz	5
资源块总数	10
蜂窝用户的最大发射功率/mW	200
D2D 发射功率/mW	10
噪声功率谱密度/(mW · Hz ⁻¹)	10 ^{-17.4}

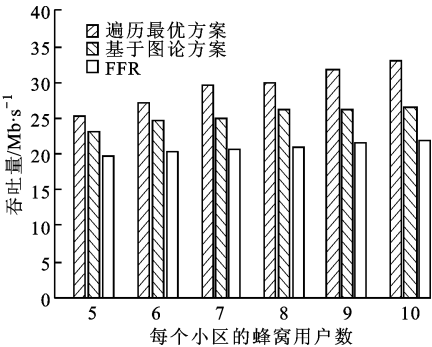


图 6 不同分配方案下系统吞吐量随蜂窝用户数的变化情况

吐量,其时间复杂度为 $O(K^{N(M+1)})$ 。由于 FFR 方案把整个频谱分成 4 段,用户只能占用部分频谱,降低了频谱利用率,也降低了系统整体的吞吐量。本文提出的基于图论的方案通过用户分组,把复杂的 $N(M+1)$ 个用户资源分配简化为 K 个用户簇的资源分配,降低了算法的复杂度,也提高了系统的吞吐量。

图 7 给出在每个小区内蜂窝用户数为 8 时,不同资源分配方案下蜂窝用户吞吐量累积概率(CDF)曲线的变化。对于遍历最优方案,遍历所有的用户以及资源块,从中寻找最优的资源分配方案,其 CDF 曲线是最好的。由于本文基于图论的方案在计算干扰图权值时,忽略了部分较小的干扰,并且根据权值对用户进行分组,降低了部分用户的性能,因此比较遍历方案存在少量性能损失。

图 8 表示蜂窝用户数为 8 时,不同的资源分配方案对每个小区内 D2D 用户吞吐量的影响。通过比较可以发现,基于图论的方案比较接近最优的方案,且优于 FFR 方案。在 FFR 方案中,当 D2D 对位于中心位置时,只能占用本小区未使用的频谱,当 D2D 对位于边缘用户时候,占用非本小区的边缘用户的频谱。这样虽然减少了 D2D 与蜂窝用户之间的干扰,但是降低了 D2D 用户的吞吐量。同时,由

于本文系统模型中每个小区只考虑一个 D2D 用户,基于图论方案通过用户分簇减少了蜂窝用户对 D2D 用户的干扰,所以 D2D 用户的吞吐量与遍历最优方案相比较,较接近最优的方案。

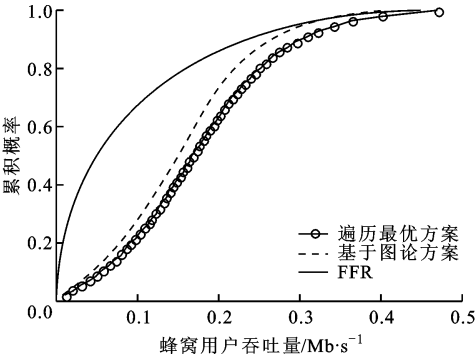


图 7 不同分配方案下蜂窝用户吞吐量的 CDF 曲线

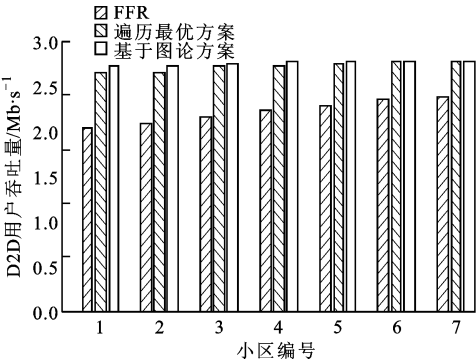


图 8 不同分配方案下 D2D 用户吞吐量的变化情况

4 结束语

本文提出了一种基于干扰图和最佳二分图匹配的上行多小区资源分配算法。该算法利用带权值的无向干扰图对所有用户进行分簇以及载波分配,一方面有效了避免蜂窝用户的小区间干扰以及蜂窝用户与 D2D 用户之间的干扰,另一方面简化了载波分配方法,大大降低了算法的复杂度,使得整个系统的吞吐量性能接近于遍历最优的方案。

参考文献:

[1] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114-119.
WANG Junyi, GONG Zhishuai, FU Jielin, et al. A survey on device-to-device communication [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119.
[2] 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.
- [3] HAN T, YIN R, XU Y F, et al. Uplink channel reusing selection optimization for device-to-device communication underlying cellular networks [C]//Proceedings of 2012 IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 559-564.
- [4] BAO P C, YU G D. An interference management strategy for device-to-device underlying cellular networks with partial location information [C]//Proceedings of 2012 IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 465-470.
- [5] ZHANG R G, CHENG X, YANG L Q, et al. Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlying cellular networks [C]//Proceedings of 2013 Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 146-151.
- [6] MIN H, SEO W, LEE J, et al. Reliability improvement using receive mode selection in the device-to-device uplink period underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 413-418.
- [7] 荣涛, 吴斌, 糜正琨. 一种LTE网络D2D通信资源共享算法 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 85-90.
- RONG Tao, WU Bin, MI Zhengkun. A resource sharing algorithm for D2D communication within LTE networks [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science, 2013, 33(3): 85-90.
- [8] YU Y W, DUTKIEWICZ E, HUANG X J. Downlink resource allocation for next generation wireless networks with inter-cell interference [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(4): 1783-1791.
- [9] CHANG R Y, TAO Z F, ZHANG J Y, et al. Multi-cell OFDMA downlink resource allocation using a graphic framework [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3494-3507.
- [10] HYANG S C, JAHEON G, BUM G C, et al. Radio resource allocation scheme for device-to-device communication in cellular networks using fractional frequency reuse [C]//Proceedings of Asia-Pacific Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 58-62.
- [11] SAHNI S, GONZALEZ T. P-complete approximation problems [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1976, 23(3): 555-565.
- [12] WILLIAM J C, WILLIAM H C, WILLIAM R P, et al. Combinatorial optimization [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-InterScience Publication, 1998: 127-191.

[本刊相关文献链接]

- 廖学文, 董可, 高贞贞, 等. 一种超宽带系统中的多天线加权预处理方案. 2012, 46(8): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201208015]
- 李巍, 李国兵, 朱世华, 等. 一种采用空时网络编码的多向中继通信方案. 2014, 48(2): 80-85. [doi:10.7652/xjtuxb201402014]
- 李建东, 郑杰, 刘勤, 等. 异构协作网络中采用令牌漏桶的多接入业务分配算法. 2014, 48(8): 7-11. [doi:10.7652/xjtuxb201408002]
- 郑鹏飞, 尤佳莉, 王劲林, 等. 一种多租户云的内部网络共享策略. 2014, 48(8): 54-59. [doi:10.7652/xjtuxb201408010]
- 董哲, 伊鹏. 采用链路聚类的动态网络社团发现算法. 2014, 48(8): 73-79. [doi:10.7652/xjtuxb201408013]
- 魏全瑞, 刘俊, 韩九强. 改进的无线传感器网络无偏距离估计与节点定位算法. 2014, 48(6): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201406001]
- 王晨旭, 秦涛, 管晓宏, 等. 有向网络兴趣社区的快速挖掘算法及其在僵尸粉检测中的应用. 2014, 48(6): 7-12. [doi:10.7652/xjtuxb201406002]
- 田寅, 贾利民, 董宏辉, 等. 列车通信网络设计问题中的双层规划模型. 2014, 48(4): 133-138. [doi:10.7652/xjtuxb201404023]
- 李建东, 姜建, 刘鑫一. 采用时延限制和资源预测的异构无线网络选择策略. 2014, 48(2): 74-79. [doi:10.7652/xjtuxb201402013]
- 林军, 倪宏, 孙鹏, 等. 一种采用神经网络PID控制的自适应资源分配方法. 2013, 47(4): 112-117. [doi:10.7652/xjtuxb201304019]
- 宋婧, 丛犁, 葛建华, 等. 双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法. 2012, 46(10): 89-94. [doi:10.7652/xjtuxb201210016]
- 崔华力, 钱德沛, 张兴军, 等. 用于无线多跳网络视频流传输的优先级机会网络编码. 2013, 47(12): 13-18. [doi:10.7652/xjtuxb201312003]
- 王超, 邓科, 庄丽莉, 等. 协作认知网络中鲁棒的分布式波束形成. 2013, 47(12): 84-89. [doi:10.7652/xjtuxb201312015]
- 叶娜, 赵银亮, 边根庆, 等. 模式无关的社交网络用户识别算法. 2013, 47(12): 19-25. [doi:10.7652/xjtuxb201312004]
- 李强, 秦涛, 管晓宏, 等. 对称性的起因: 非业务性网络流量新特性的挖掘与探索. 2013, 47(8): 19-25. [doi:10.7652/xjtuxb201308004]

(编辑 刘杨)