



# 全双工网络中基于图论的 D2D 通信资源分配算法

石纯子<sup>1,2</sup>, 朱琦<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;  
2. 南京邮电大学教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 针对全双工蜂窝通信场景, 以最大化系统的吞吐量为目标, 提出了一种基于图着色的信道分配算法。首先利用匈牙利算法将上行蜂窝用户和下行蜂窝用户配对, 这一对蜂窝用户同时使用一个资源块进行上下行通信; 然后在保证蜂窝用户服务质量的前提下基于图论着色理论为 D2D (device-to-device) 用户分配信道。仿真结果表明, 该算法可以提高系统吞吐量, 获得较高的频谱效率。

**关键词:** D2D 通信; 全双工; 图论; 信道分配

**中图分类号:** TN929

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.1000-0801.2018249

## Graph-based D2D communication resource allocation algorithm in full duplex network

SHI Chunzi<sup>1,2</sup>, ZHU Qi<sup>1,2</sup>

1. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China  
2. Key Lab on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** For full duplex cellular communication scenario, a resource allocation algorithm based on graph coloring was proposed in order to maximize the throughput of the system. Firstly, the Hungarian algorithm was used to pair the upstream cellular users with the downstream cellular users. The pair of cellular users simultaneously used a resource block for uplink and downlink communication; then, under the premise of guaranteeing the quality of service of cellular users, channels were assigned for D2D (device-to-device) users based on graph theory coloring theory. Simulation results show that the algorithm can improve the system throughput and obtain higher spectral efficiency.

**Key words:** D2D communication, full duplex cellular, graph theory, channel allocation

收稿日期: 2018-03-04; 修回日期: 2018-09-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No.61571234, No.61401225); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (No.2013CB329005); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20140894)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61571234, No.61401225), The National Basic Research Program of China (973 Program) (No.2013CB329005), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No.BK20140894)



## 1 引言

当下,多媒体业务对无线接入的数据速率需求越来越高,促进了通信技术的发展。允许距离较近的用户终端之间建立直通通信链路,而不经基站或者核心网中继的 D2D (device-to-device) 通信<sup>[1]</sup>应运而生,它可以提高网络性能、提高频谱效率以及减少终端通信时延。D2D 用户可以复用蜂窝用户的频谱进行通信,二者间不可避免地存在同频干扰,如若不合理地进行干扰管理,网络的性能会急剧恶化,资源分配成为众多学者研究的重点。

目前 D2D 通信资源分配的研究方向大多集中于半双工 D2D 通信<sup>[2-4]</sup>。近年来,由于自干扰消除技术<sup>[5]</sup>获得了较大的进步,全双工 D2D 通信也逐渐成为研究热点之一。与半双工通信相比,全双工通信允许无线通信设备在同一频段上同时收发数据,因此有频谱效率翻倍的潜力<sup>[6-7]</sup>。参考文献[8]提出了一种保障蜂窝用户服务质量的全双工启发式算法,但是复杂度较高,网络用户数多时难以实施。参考文献[9-11]均以最大化系统吞吐量为资源分配的目标,以发挥全双工通信的优势。参考文献[9-10]考虑了全双工通信场景下自干扰链路的影响。参考文献[9]中自干扰信号在基站侧,利用图论着色方法和匹配方法提出了一种两阶段的资源分配策略,保证了系统中蜂窝用户的服务质量需求,然而蜂窝用户和 D2D 用户最多使用一个资源块,系统资源没有得到有效利用。参考文献[10]中自干扰信号在 D2D 用户端,在同时保障蜂窝用户与 D2D 用户服务质量的前提下,通过图论中点着色理论对 D2D 用户进行资源分配,但是一对 D2D 只能复用一个蜂窝用户的资源。参考文献[11]忽略自干扰带来的影响,提出一种基于图论的 D2D 通信资源分配方案以最大化系统吞吐量。参考文献[12]讨论了认知网络中的 D2D 全双工通信。

本文考虑基站全双工蜂窝通信的场景,在基站侧受到自干扰的情况下,研究系统中蜂窝用户

和 D2D 用户的资源共享问题。首先利用匈牙利算法将上行蜂窝用户和下行蜂窝用户配对,一对蜂窝用户对同时共享一个资源块进行上下行通信;然后在保证蜂窝用户的服务质量的前提下基于图论着色理论为 D2D 用户分配信道。

## 2 系统模型

本文所研究的系统模型如图 1 所示,考虑单小区场景,小区半径为  $R$ ,基站位于小区的圆心,小区内随机分布着  $M$  个蜂窝用户和  $N$  对 D2D 用户,蜂窝用户分为上行 (UpLink, UL) 的  $M_1$  个用户和下行 (DownLink, DL) 的  $M_2$  个用户,  $M = M_1 + M_2$ ,每对 D2D 由一个发射端和一个接收端组成,发射端和接收端之间的距离恒定。所有终端设备都配有单个全向天线,基站侧同时配有收发天线并且工作在全双工状态下,假设基站可获得该小区内所有用户 (蜂窝用户和 D2D 用户) 的信道状态信息 (channel state information, CSI)。小区内用户共使用  $K$  ( $K = \max(M_1, M_2)$ ) 个资源块进行通信,一个蜂窝用户的信道可被多对 D2D 用户使用,一对 D2D 用户可使用多个蜂窝用户的信道。此外,蜂窝用户和 D2D 用户均以固定功率发射。

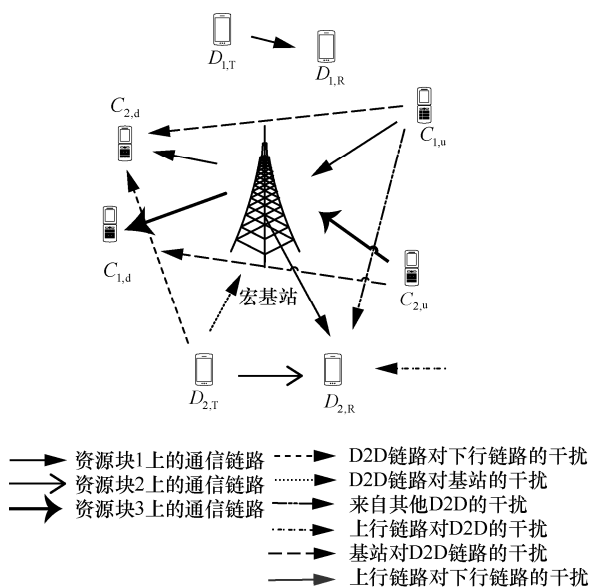


图1 系统模型

为方便下文描述,定义相关参数如下:  $C$  表示蜂窝用户集合,  $C = \{C_{1,u}, C_{2,u}, \dots, C_{i,u}, \dots, C_{M_1,u}, C_{1,d}, C_{2,d}, \dots, C_{j,d}, \dots, C_{M_2,d}\}$ , 其中  $C_{i,u}$  表示上行蜂窝用户  $i$ ,  $C_{j,d}$  表示下行蜂窝用户  $j$ ,  $D$  表示 D2D 用户集合,  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n, \dots, D_N\}$ , 其中  $D_n$  表示 D2D 用户对  $n$ ; 假设  $C_{i,u}$ 、 $C_{j,d}$  和  $D_n$  在资源块  $k$  上的发射功率恒定, 分别为  $p_{C,u}^{i,k}$ 、 $\frac{P_c^d}{M_2}$  和  $p_d^{n,k}$ , 对应的链路增益分别为  $g_{C,u}^{i,k}$ 、 $g_{C,d}^{j,k}$  和  $g_d^{n,k}$ , 其中  $P_c^d$  表示基站的总发射功率。干扰分析如下:

$$C_{j,d} \rightarrow C_{i,u}(\text{SI}): I_{j,i}^k = \frac{P_c^d}{M_2} \eta_{\text{SI}} \quad (1)$$

$$D_n \rightarrow C_{i,u}: g_{n,i}^k, I_{n,i}^k = p_d^{n,k} g_{n,i}^k \quad (2)$$

$$C_{i,u} \rightarrow C_{j,d}: g_{i,j}^k, I_{i,j}^k = p_{C,u}^{i,k} g_{i,j}^k \quad (3)$$

$$D_n \rightarrow C_{j,d}: g_{n,j}^k, I_{n,j}^k = p_d^{n,k} g_{n,j}^k \quad (4)$$

$$C_{i,u} \rightarrow D_n: g_{i,n}^k, I_{i,n}^k = p_{C,u}^{i,k} g_{i,n}^k \quad (5)$$

$$C_{j,d} \rightarrow D_n: g_{j,n}^k, I_{j,n}^k = \frac{P_c^d}{M_2} g_{j,n}^k \quad (6)$$

$$D_n \rightarrow D_n: g_{n,n}^k, I_{n,n}^k = p_d^{n,k} g_{n,n}^k \quad (7)$$

其中, 式 (1) 中的  $\eta_{\text{SI}}$  表示基站侧的自干扰 (SI) 消除因子, 其反映了基站在同一频段上发出的下行信号对接收的上行信号带来的干扰; 式 (2) 表示 D2D 用户的发射端对基站的干扰, 其中  $g_{n,i}^k$  表示  $D_n$  在资源块  $k$  上对  $C_{i,u}$  干扰链路的信道增益; 式 (3) 表示上行蜂窝用户对下行蜂窝用户的干扰, 其中  $g_{i,j}^k$  表示  $C_{i,u}$  在资源块  $k$  上对  $C_{j,d}$  干扰链路的信道增益, 下文依次类推; 式 (4) 表示 D2D 用户的发射端对下行蜂窝用户的干扰; 式 (5) 表示上行蜂窝用户对 D2D 用户接收端的干扰; 式 (6) 表示基站发射的信号对 D2D 用户接收端的干扰; 式 (7) 表示共享同一资源块的 D2D 用户间的干扰。

小区内所有用户的大尺度衰落模型均采用参考文献[13]的单斜率路径损耗模型, 即  $P_R = \kappa P_T L^{-\alpha}$ , 其中  $\kappa$  和  $\alpha$  分别是路径损耗常数和路径损耗指

数,  $L$  表示收发双方的距离。小尺度衰落为瑞利衰落<sup>[14]</sup>, 即信道响应服从独立同分布的复高斯分布。

资源块的分配结果分别用指示变量  $\rho_{C,u}^{i,k}$ 、 $\rho_{C,d}^{j,k}$  和  $\rho_d^{n,k}$  来表示:

$$\rho_{C,u}^{i,k} = \begin{cases} 1, & C_{i,u} \text{ 使用第 } k \text{ 个资源块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{C,d}^{j,k} = \begin{cases} 1, & C_{j,d} \text{ 使用第 } k \text{ 个资源块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho_d^{n,k} = \begin{cases} 1, & D_n \text{ 使用第 } k \text{ 个资源块} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

上行链路在基站侧受到来自其他 D2D 用户的干扰和自干扰信号, 因此基站侧的在资源块  $k$  上对用户  $C_{i,u}$  发射信号的接收用户信干噪比为:

$$\text{SINR}_i^k = \frac{\rho_{C,u}^{i,k} p_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0 + \sum_{n=1}^N \rho_d^{n,k} I_{n,i}^k + \sum_{j=1}^{M_2} \rho_{C,d}^{j,k} I_{j,i}^k} \quad (11)$$

其中,  $N_0$  表示所有用户接收的噪声功率。

下行链路蜂窝用户受到来自其他 D2D 用户的干扰和上行蜂窝用户的干扰, 下行用户  $C_{j,d}$  在资源块  $k$  上的接收信干噪比为:

$$\text{SINR}_j^k = \frac{\rho_{C,d}^{j,k} \cdot \frac{P_c^d}{M_2} \cdot g_{C,d}^{j,k}}{N_0 + \sum_{n=1}^N \rho_d^{n,k} I_{n,j}^k + \sum_{i=1}^{M_1} \rho_{C,u}^{i,k} I_{i,j}^k} \quad (12)$$

同理, 表示 D2D 用户对  $D_n$  在资源块  $k$  上的接收信干噪比为:

$$\text{SINR}_n^k = \frac{\rho_d^{n,k} p_d^{n,k} g_d^{n,k}}{N_0 + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq n}}^N \rho_d^{n,k} I_{n,n}^k + \sum_{i=1}^{M_1} \rho_{C,u}^{i,k} I_{i,n}^k + \sum_{j=1}^{M_2} \rho_{C,d}^{j,k} I_{j,n}^k} \quad (13)$$

根据香农公式可得三者的传输速率为:

$$R_i^k = W \log(1 + \text{SINR}_i^k) \quad (14)$$

$$R_j^k = W \log(1 + \text{SINR}_j^k) \quad (15)$$

$$R_n^k = W \log(1 + \text{SINR}_n^k) \quad (16)$$



其中,  $W$  表示每个资源块的带宽。

本文以最大化系统总速率为目标, 最优的资源块分配策略可用如下问题表示:

$$\max_{\rho_{C,u}^{i,k}, \rho_{C,d}^{j,k}, \rho_d^{n,k}} T = \sum_{k=1}^K \left( \sum_{i=1}^{M_1} R_i^k + \sum_{j=1}^{M_2} R_j^k + \sum_{n=1}^N R_n^k \right) \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^{M_1} \rho_{C,u}^{i,k} \leq 1, \sum_{j=1}^{M_2} \rho_{C,d}^{j,k} \leq 1, 1 \leq k \leq K \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{C,u}^{i,k} R_i^k \geq R^{\text{th}}, 1 \leq i \leq M_1 \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{C,d}^{j,k} R_j^k \geq R^{\text{th}}, 1 \leq j \leq M_2 \quad (20)$$

其中, 式 (18) 表示一个资源块最多被一个上行链路用户或下行链路用户使用, 式 (19) 和式 (20) 表示蜂窝用户的最低 QoS 需求。该整数非线性规划 (MINLP) 问题是一个 NP 难问题, 它的整数约束和非凸特性使得难以直接求得最优解, 因此第 3 节提出一种基于图着色的资源分配算法来解决这一问题。

### 3 基于图着色的资源共享算法

本节将上述 NP 难问题分解为两个实现过程, 首先将上下行蜂窝用户的信道分配问题建模成加权二部图的最大匹配问题并用匈牙利算法求解, 然后再利用图论点着色的方法为 D2D 用户分配资源。

#### 3.1 蜂窝用户的资源分配

上行的  $M_1$  个蜂窝用户和下行的  $M_2$  个蜂窝用户共享  $K$  ( $K = \max(M_1, M_2)$ ), 不失一般性, 假设  $K = M_1$ , 即上行蜂窝用户数与资源块数相等) 个资源块进行通信, 一个资源块最多被一个上行链路用户或下行链路用户使用, 将使用同一资源块的上下行蜂窝用户称为一个蜂窝用户对。首先将  $K$  个资源块随机分配给  $K$  个上行蜂窝用户, 由于系统中蜂窝用户的优先级更高, 为简化优化问题, 首先在不考虑 D2D 用户复用的情况下为上下行蜂窝用户分配信道。为追求最大的系统吞吐量, 第

一步的分配目标如下:

$$\max_{\pi_{j,i}} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} W \left[ \text{lb} \left( 1 + \frac{p_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0 + I_{j,i}^k} \right) + \pi_{j,i} \text{lb} \left( 1 + \frac{\frac{P_c^d}{M_2} \cdot g_{C,d}^{j,k}}{N_0 + I_{i,j}^k} \right) \right] \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \pi_{j,i} \in \{0, 1\}, \sum_{i=1}^{M_1} \pi_{j,i} \leq 1, \sum_{j=1}^{M_2} \pi_{j,i} \leq 1, 1 \leq i \leq K,$$

$$1 \leq j \leq M_2$$

$$\text{式 (19), 式 (20)} \quad (22)$$

其中,  $\pi_{j,i}$  表示  $C_{i,u}$  和  $C_{j,d}$  是否共享同一资源块, 若二者组成一个蜂窝用户对, 相应的  $\pi_{j,i}$  为 1, 否则为 0。由于信干噪比正比于传输速率, 进一步地, 将它们共享同一资源块的效用  $w_{i,j}$  定义如下:

$$w_{i,j} = \begin{cases} \max \left( \frac{p_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0 + I_{j,i}^k} + \frac{\frac{P_c^d}{M_2} \cdot g_{C,d}^{j,k}}{N_0 + I_{i,j}^k}, \frac{p_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0}, \frac{\frac{P_c^d}{M_2} \cdot g_{C,d}^{j,k}}{N_0} \right), \\ \sum_{k=1}^K \rho_{C,u}^{i,k} R_i^k \geq R^{\text{th}}, \sum_{k=1}^K \rho_{C,d}^{j,k} R_j^k \geq R^{\text{th}} \\ \max \left( \frac{p_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0}, \frac{p_{C,d}^{j,k} g_{C,d}^{j,k}}{N_0} \right), \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

$w_{i,j}$  越大, 资源块可服务于蜂窝用户的最大传输速率越大。则问题 (23) 可转化为加权二分图的匹配问题:

$$\max_{\pi_{j,i}} = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \pi_{j,i} w_{i,j} \quad (24)$$

$$\text{s.t. 式 (22)} \quad (25)$$

图 2 进一步说明了上下行蜂窝用户的匹配问题, 在图 2 中, 上行蜂窝用户和下行蜂窝用户构成了二分图中两组内部互不相交的顶点集合, 下行蜂窝用户选择最合适的上行蜂窝用户进行通信。如果二者构成蜂窝用户对, 即顶点  $i$  与顶点  $j$

通过边相连,同时边的权重为  $w_{i,j}$ 。匈牙利算法可以用来求解该问题,该算法是一种有效的二分匹配算法。假设下行蜂窝用户数不大于上行蜂窝用户数,即  $M_2 \leq M_1$ ,但匈牙利算法要求二分图是完全对称的。为了符合此要求,可以为原始二分图中的下行蜂窝用户集添加  $M_1 - M_2$  个虚拟顶点。

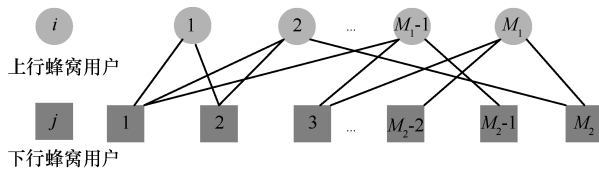


图2 上下行蜂窝用户匹配问题的二分图

匹配问题求解完毕后,若  $\pi_{j,i}=1$ ,则上行蜂窝用户  $C_{i,u}$  和下行蜂窝用户  $C_{j,d}$  组成一对蜂窝用户对,接下来需要对分配结果进行修正:

经过式(23)计算所得的权重若取自

$$\left( \frac{P_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0 + I_{j,i}^k} + \frac{P_c^d \cdot g_{C,d}^{j,k}}{M_2} \cdot \frac{P_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0 + I_{i,j}^k}, \frac{P_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0}, \frac{P_c^d \cdot g_{C,d}^{j,k}}{M_2} \cdot \frac{P_{C,u}^{i,k} g_{C,u}^{i,k}}{N_0} \right)$$

中的第

一项,则上行蜂窝用户  $C_{i,u}$  和下行蜂窝用户  $C_{j,d}$  共享资源;若取第二项,则上行蜂窝用户  $C_{i,u}$  独享资源;若取最后一项,则下行蜂窝用户  $C_{j,d}$  独享原分配给  $C_{i,u}$  的资源。

### 3.2 D2D 用户的资源分配

图论的应用已经涵盖了人类学、计算机科学、化学、环境保护、流体动力学等领域。由于图论可以提供有效的系统建模方式,现也被广泛运用于资源分配中。

用  $G$  表示一个图,对  $G$  的每个顶点着色,使得相邻顶点着不同颜色,称为对  $G$  的正常顶点着色。如果用  $k$  种颜色可以对  $G$  进行正常顶点着色,称  $G$  可  $k$  正常顶点着色。图论中传统的点着色问题主要研究顶点着色所需的最小颜色数,此时每个用户只能分得一种颜色<sup>[15]</sup>。为提高频谱效率,本文允许一对 D2D 用户使用多个资源块,即每对

D2D 用户可使用多种颜色。下面首先建立用户间的干扰图,基于建立的干扰图提出一种资源分配算法为小区中的 D2D 用户分配信道。

对于每个资源块都建立一张蜂窝用户对与 D2D 用户之间的干扰图,如图3所示,假设经过第3.1节中蜂窝用户间的配对,上行蜂窝用户  $C_{i,u}$  和下行蜂窝用户  $C_{j,d}$  共享资源块  $k$ ,则对于颜色  $k$ ,使用该颜色的蜂窝用户(图3中顶点  $C_{i,u}$  或  $C_{j,d}$  可能只有一个)和所有 D2D 用户组成图的顶点集合  $V$ ,任意两点之间都存在边(干扰),并加入权重因子  $e_{i,j}$  来表征两点之间的干扰大小,权重的大小等于该点所受到的干扰的大小,即  $e_{i,j} = I_{i,j}^k, i, j \in V$ 。

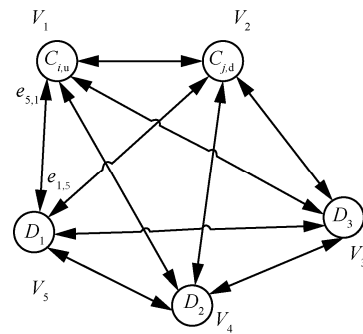


图3 建立干扰图

使用同一资源块的用户形成的集合称为一个簇(cluster),系统中有  $K$  个资源块,共可以形成  $K$  个簇,因为 D2D 用户可使用多种颜色,所以一个 D2D 用户可以同时属于多个簇。经过第3.1节中蜂窝用户间的配对,蜂窝用户的信道已分配完毕,故每个簇内的初始点为可用该颜色的蜂窝用户。初始时所有 D2D 用户构成待加入簇内的候选用户集合,每次从中选择对簇内用户干扰最小的点,若其同时满足以下两个条件:

(1)  $\Delta R = R(\text{cluster\_}k \cup n) - R(\text{cluster\_}k) > 0$ ,即添加 D2D 用户  $n$  可获得额外的速率增益,满足最大化系统吞吐量的目标;

(2) 检查簇内初始的蜂窝用户的信干噪比,保证添加 D2D 用户  $n$  后蜂窝用户受到的干扰小于



门限,即满足式(19)和式(20)的要求。

则将其加入该簇,否则将其从候选用户集合中删除,遍历所有资源块直至候选用户集为空,资源块分配完毕。D2D 用户资源分配的流程如图4所示。

#### 算法1 基于图着色的资源共享算法

for  $i=1$  to  $M$

为上行蜂窝用户随机分配信道

end for

构建上下行蜂窝用户间的二分图

if  $M_2 < M_1$

图中添加  $M_1 - M_2$  个虚拟顶点

end if

计算二分图边上的权重并运用匈牙利算法为上下行蜂窝用户配对

构建 D2D 用户间的干扰图并计算边上的权重

for  $k=1$  to  $K$

初始化集合  $A$  为第  $k$  簇蜂窝用户集合

集合  $B$  为所有 D2D 用户构成的候选用户集合

while( $B \neq \emptyset$ )

选出对集合  $A$  中用户干扰最小的用户  $j$ , 若有多个随机选择一个

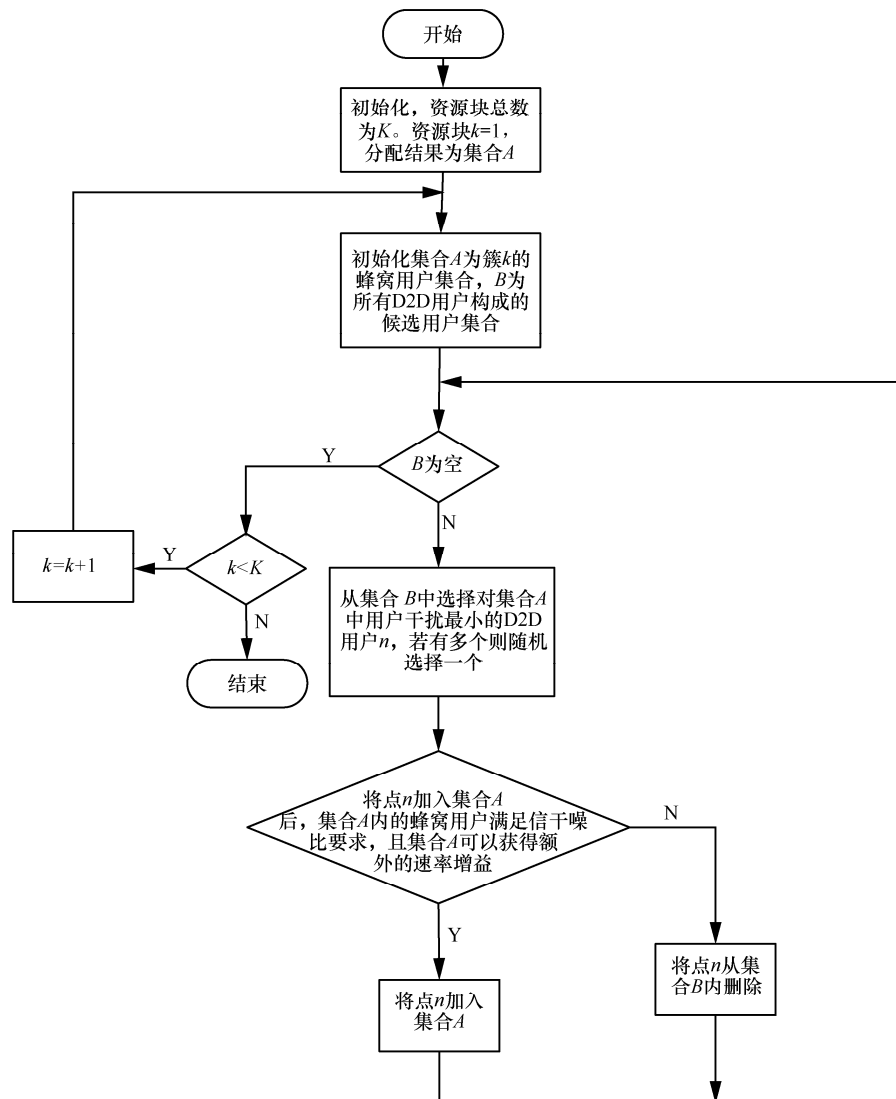


图4 D2D 用户资源分配流程

if  $j$  加入  $A$  后  $\Delta R > 0$  且式 (19)  
和式 (20) 成立

$$A = A \cup \{j\}, B = B \setminus \{j\}$$

else

$$B = B \setminus \{j\}$$

end if

end while

end for

接下来将本文和参考文献[9]中提出的图着色算法进行简单比较。本文中对于每种颜色, 候选成员集最多含  $N$  对 D2D 用户, 每次选择 1 对用户加入相应簇, 共有  $K$  种颜色, 故最多需要  $MK$  次循环即可完成分簇过程。参考文献算法利用图着色为蜂窝用户配对,  $K$  个上行蜂窝用户每次最多与一个下行蜂窝用户配对, 故最多需要  $K$  次循环。

#### 4 仿真结果及性能分析

本节采用 MATLAB 软件对算法进行仿真, 将所提出的算法与参考文献[9]中提出的着色算法、随机算法进行比较分析。具体仿真参数的设置在表 1 中。

表 1 系统仿真参数

| 参数                      | 数值       |
|-------------------------|----------|
| 小区半径 ( $R$ )            | 500 m    |
| D2D 用户对之间距离             | 20 m     |
| 资源块带宽 ( $W$ )           | 1 MHz    |
| 资源块数目 ( $K$ )           | 10       |
| 蜂窝用户数 ( $M_1=M_2$ )     | 10       |
| 基站的总发射功率                | 46 dBm   |
| 蜂窝用户的发射功率               | 24 dBm   |
| D2D 用户在每个资源块上的发射功率      | 24 dBm   |
| 蜂窝用户的最低速率要求             | 1 Mbit/s |
| 路径损耗常数                  | 0.01     |
| 路径损耗指数                  | 4        |
| 噪声功率                    | -104 dBm |
| 自干扰抵消因子 ( $\eta_{SI}$ ) | 110 dB   |

D2D 用户的总速率与 D2D 用户数的关系如

图 5 所示, 随着 D2D 用户数的增加, 3 种算法的 D2D 用户的总速率都在不断增加。参考文献[9]的算法首先基于图着色为蜂窝用户配对, 再利用 KM 算法将蜂窝用户对与 D2D 用户配对, 每个蜂窝用户对挑选一对最佳的 D2D 用户与其共享资源。随着 D2D 用户数的增加, 参考文献[9]算法中蜂窝用户越容易选择带来更大总速率增益的 D2D 用户, 因此 D2D 用户的总速率不断提高, 但是增长速度低于本文算法。本文算法随着 D2D 用户数的增加, 一个资源块可以供更多的 D2D 用户同时使用, 因此带来了更大的 D2D 速率增益。

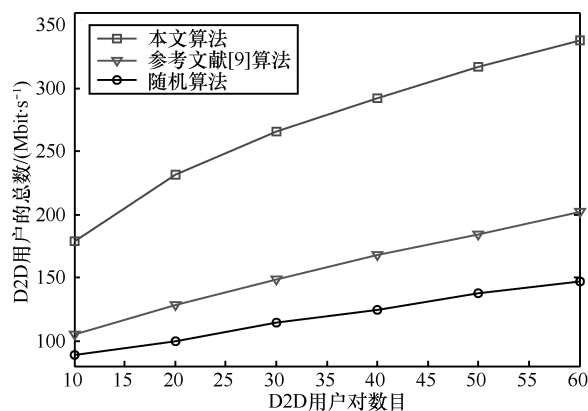


图 5 D2D 用户的总速率与 D2D 用户数的关系

蜂窝用户总速率与 D2D 用户数的关系如图 6 所示, 本文算法允许一对蜂窝用户对的资源被多个 D2D 用户共享, 随着 D2D 用户数的增加, 本文算法蜂窝用户受到的干扰逐渐增加, 因此总速率下降。参考文献[9]算法中每个蜂窝用户对的资源最多被一对 D2D 用户共享, 因此蜂窝用户的速率较为稳定。随机算法首先将上行蜂窝用户随机地与下行蜂窝用户配对, 然后蜂窝用户对在满足其最低速率的条件下随机选择一对 D2D 用户与其共享资源, 因为用户间的干扰没有合理控制, 因此蜂窝用户总速率最低, 随着 D2D 用户数的增加, 其总速率也在不断下降。

系统吞吐量与 D2D 用户数的关系如图 7 所示, 随着 D2D 用户数的增加, 3 种算法的系统吞吐量均呈上升趋势, 这是因为 D2D 用户总速率上

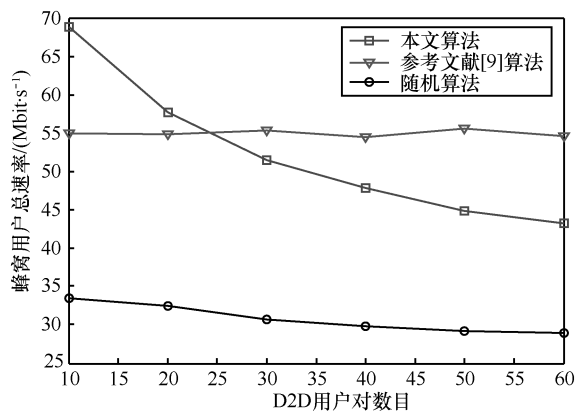


图6 蜂窝用户总速率与D2D用户数的关系

升的速度高于蜂窝用户总速率下降的速度。可以看出,因为本文算法一个资源块可以供多对D2D用户同时使用,频谱效率明显高于其他算法。同时结合图6可以看出,本文算法以牺牲蜂窝用户的速率为代价来换取D2D用户总速率和系统吞吐量的提高。

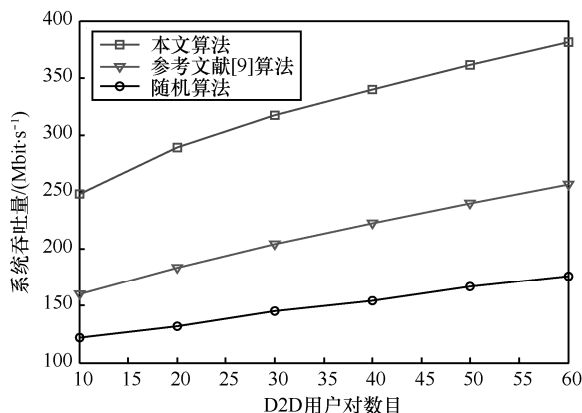


图7 系统吞吐量与D2D用户数的关系

系统吞吐量与蜂窝用户最低速率要求的关系如图8所示,可以看出,随着蜂窝用户最低速率要求的提高,系统吞吐量在不断下降,这是因为蜂窝用户所能容忍来自D2D用户的干扰在不断降低,更少的D2D用户可以与蜂窝用户共享资源,所以造成了系统吞吐量的减少。但是算法允许一对蜂窝用户和多对D2D用户共享资源,资源分配得更加精细灵活,所以其吞吐量高于参考文献[9]的算法。此外,D2D用户数目越多,越利于选择带来速率增益更大的用户,因此吞吐量越高。

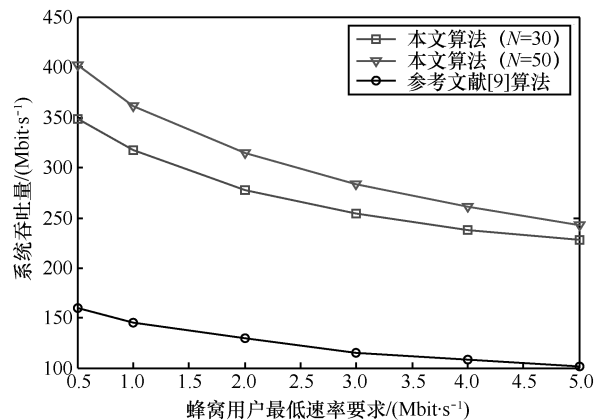


图8 系统吞吐量与蜂窝用户最低速率要求的关系

## 5 结束语

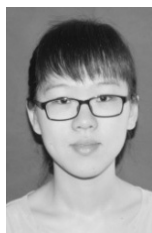
近年来,全双工通信因为其高频谱效率的优点得到人们的广泛关注,它允许通信设备在同一频段上同时进行收发信息,有频谱效率翻倍的潜力,可以在一定程度上打破日益匮乏的频谱资源对通信系统发展的限制。全双工通信在引入更加复杂的干扰信号的同时拥有更高的频谱效率,要想充分发挥其优势,系统中需要引入更加精细的干扰管理机制。本文研究了全双工蜂窝通信场景下蜂窝用户和D2D用户的资源共享问题,提出的算法能够有效提高系统的吞吐量。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] CHEN X H, CHEN L, ZENG M X, et al. Downlink resource allocation for device-to-device communication underlying cellular networks[C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC), September 9-12, 2012, Sydney, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2012: 232-237.
- [3] AN R, SUN J, ZHAO S, et al. Resource allocation scheme for device-to-device communication underlying LTE downlink network[C]//2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), October 25-27, 2012, Huangshan, China. [S.l.:s.n.], 2012: 1-5.
- [4] ZHU D H, WANG J H, LEE A, et al. Downlink resource reuse for device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(5): 531-534.

- [5] BHARADIA D, MCMILIN E, KATTI S. Full duplex radios[C]//ACM SIGCOMM, August 12-16, 2013, Hong Kong, China. New York: ACM Press, 2013: 375-386.
- [6] 丁家昕, 冯大权, 钱恭斌, 等. 全双工 D2D 通信关键技术及进展[J]. 电信科学, 2018, 34(5): 107-114.  
DING J X, FENG D Q, QIAN G B, et al. Key technologies and progress of full-duplex D2D communication[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(5): 107-114.
- [7] ZHANG Z S, LONG K P, VASILAKOS A V, et al. Full-duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(7): 1369-1409.
- [8] CHENG E C, ZHANG X, ZHANG H L. Heterogeneous statistical QoS provisioning for full-duplex D2D communications over 5G wireless networks[C]//2015 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [9] REN L M, ZHAO M, GU X Y, et al. A two-step resource allocation algorithm for D2D communication in full duplex cellular network[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 4-7, 2016, Valencia, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [10] 黄巍, 柯文韬, 张海波, 等. 全双工 D2D 通信系统下的一种资源分配算法[J]. 通信与网络, 2016, 42(12): 93-96.  
HUANG W, KE W T, ZHANG H B, et al. A multi-sharing resource allocation scheme for full-duplex D2D communications underlying cellular networks[J]. Communication and Network, 2016, 42(12): 93-96.
- [11] YANG T H, ZHANG R Q, CHENG X, et al. Resource sharing for device-to-device communications underlying full-duplex cellular networks[C]//2014 IEEE International Conference on Communication Systems, December 26-28, 2014, Suzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2014: 16-20.
- [12] 谢显中, 田瑜, 姚鑫凌, 等. 认知网络中 D2D 全双工通信的速率最大化功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 1002-1006.
- XIE X Z, TIAN Y, YAO X L, et al. Power allocation algorithm of maximizing rate for D2D full-duplex communication in cognitive networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(4): 1002-1006.
- [13] BIN W, LI C, CHEN X H, et al. Resource allocation optimization for device-to-device communication underlying cellular networks[C]//2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 15-18, 2011, Budapest, Hungary. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [14] XU C, SONG L Y, 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.
- [15] 陈卫东. 求图着色问题的新算法[J]. 微计算机应用, 2004, 25(4): 391-395.  
CHEN W D. New algorithms for graph coloring problem[J]. Microcomputer Applications, 2004, 25(4): 391-395.

## [作者简介]



石纯子(1994-), 女, 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室硕士生, 主要研究方向为异构网络中 D2D 通信的资源分配。



朱琦(1965-), 女, 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代通信技术、宽带无线接入、OFDM 和无线资源的动态分配等。