

# 蜂窝网络中支持全双工 D2D 通信的资源分配算法

李 云<sup>1</sup>, 杨 雄<sup>1</sup>, 张 乐<sup>1</sup>, 夏 威<sup>2</sup>

(1 重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;

2 重庆邮电大学 通信新技术应用中心, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对全双工通信场景, 提出一种最大权重匹配的资源分配算法. 该算法在保证蜂窝用户的服务质量需求和 D2D 用户通信链路信噪比门限的约束条件下, 利用图论中的最大权重匹配算法协调 D2D 用户对和蜂窝用户之间的资源分配以最大化系统的吞吐量. 仿真结果表明此算法有效提高了系统吞吐量, 同时在自干扰消除为 110 dB 时, 全双工通信模式下的 D2D 链路吞吐量接近半双工 D2D 通信的两倍.

**关键词:** 全双工; D2D 通信; 资源分配

**中图分类号:** TN929. 5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2016)11-0142-05

## Resource Allocation Supporting Full Duplex D2D Communication in Cellular Networks

LI Yun<sup>1</sup>, YANG Xiong<sup>1</sup>, ZHANG Le<sup>1</sup>, XIA Wei<sup>2</sup>

(1 Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2 Institute of Application of Advanced Telecommunication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** This paper proposes a maximum-weight-matching resource allocation algorithm. Under the constraints that guarantee the quality of service requirement of the cellular users, and SNR threshold of D2D user, the proposed algorithm coordinates resource allocation between D2D users and cellular users to maximize system throughput. The simulation result show that the proposed algorithm can improve the system throughput, and under 110 dB of SI cancellation, D2D link throughput of full-duplex mode is nearly twice than half-duplex mode.

**Key words:** full duplex; D2D communication; resource allocation

### 1 引言

为了缓解无线频谱资源的日益匮乏, 为了更为合理地利用宝贵的频谱资源, 人们提出了一种灵活、高效的蜂窝网的通信模式——D2D(Device to Device)技术<sup>[1-6]</sup>. 在 D2D 通信中, 由于 D2D 用户共享蜂窝用户的频谱资源从而导致 D2D 用户与蜂窝用户之间产生干扰, 这严重影响用户服务质量, 降低系统容量. 因此, 设计能有效抑制 D2D 用户与蜂窝用户之间干扰的无线资源分配算法是在蜂窝移动通信

系统中实现 D2D 通信的关键.

现有资源分配的研究主要集中在半双工(Half Duplex, HD) D2D 通信模式下. 由于自干扰 SI(Self-Interference)消除技术的突破, 近年来学者开始关注全双工(Full Duplex, FD) D2D 通信, 文献[3]提出一种在全双工模式下的 D2D 通信协议, 通过该协议分配资源, 与半双工通信相比, 提高了带宽效率和系统吞吐量, 但是此资源分配方式属于专用模式, 即分别为 D2D 用户和蜂窝用户分配不同正交的频谱资源, 降低了频谱资源利用率. 文献[4]提出

了全双工模式下 D2D 用户复用上行链路资源,以干扰受限区域将蜂窝用户的信道资源划分为可复用的与不可复用的资源,D2D 复用受限区域外的信道资源,这样有效减小蜂窝用户与 D2D 用户之间的同频干扰,与半双工相比有效提高了系统吞吐量,但是该系统只考虑一对 D2D 用户和一个蜂窝用户的资源复用情况,不适合多对 D2D 用户同多个蜂窝用户复用资源的通信场景.文献[5]以吞吐量最大化为目标,提出一种图论中图着色的全双工 D2D 通信资源分配方案,虽然提高了系统吞吐量,但是该文献未考虑全双工通信的自干扰所带来的影响.

针对上述问题,本文针对全双工通信场景,解决多对 D2D 用户与多个蜂窝用户之间的资源分配问题,提出一种基于全双工 D2D 通信的最优资源分配算法.

## 2 系统模型及问题描述

如图 1 所示,假设在单小区内,基站位于小区中心位置,小区存在  $N$  个蜂窝用户和  $M$  对 D2D 用户,定义蜂窝用户组成的集合为  $C = \{CUE_1, CUE_2, \dots, CUE_N\}$ ,D2D 用户对的集合为  $D = \{D2D_1, D2D_2, \dots, D2D_M\}$ .蜂窝用户通过基站(BS)转发进行通信,D2D 用户对在复用蜂窝用户的上行资源时以全双工的通信方式直接通信.

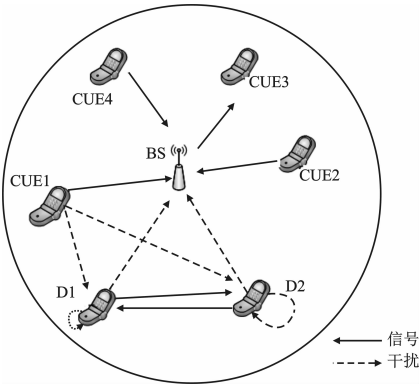


图 1 全双工 D2D 通信的系统模型

在上述全双工通信模式中,一对 D2D 用户中的两个 D2D 用户均对基站接收来自蜂窝用户的信号形成干扰,同时蜂窝用户的发送信号也会对 D2D 用户造成干扰.由于 D2D 用户对以全双工方式通信,所以会给自身带来自干扰.在本文中,如果考虑多个 D2D 用户对与蜂窝用户共享同一个信道,将给基站带来了更多估计信道增益的时间开销,同时,不同的 D2D 用户对在同一时间发送各自的导频信号会导

致冲突碰撞,使基站难以估算蜂窝用户与 D2D 对之间信道增益,因此本文假设一个蜂窝用户至多与一对 D2D 共享信道,一对 D2D 用户也至多与一个蜂窝用户共享信道.

假设整个信道资源被预先分给了  $N$  个蜂窝用户,第  $j$  个( $j = 1, \dots, N$ )蜂窝用户的发射功率定义为  $p_{c_j}$ ,第  $i$  对 D2D 用户中第  $l$  ( $l \in \{1, 2\}$ ) 个 D2D 用户的发射功率定义为  $p_{D_{i,l}}$ ,蜂窝用户到基站的链路增益为  $g_{c_j,BS}$ ,第  $j$  个蜂窝用户到第  $i$  对 D2D 用户中的第  $l$  个 D2D 用户链路增益为  $g_{c_j,D_{i,l}}$ ,第  $i$  对 D2D 用户之间的链路增益为  $G_{D_{i,l}}$ ,第  $i$  对 D2D 用户中第  $l$  个 D2D 用户到基站之间的链路增益为  $g_{D_{i,l},BS}$ .第  $i$  对 D2D 用户中第  $l$  个 D2D 用户的自干扰为  $SI_{i,l}$ ,参考文献[7]可得  $SI_{i,l} = \eta p_{D_{i,l}}$  ( $0 \leq \eta \leq 1$ ), $\eta$  为自干扰消除增益因子,并且现有自干扰值可达  $-110$  dB.噪声功率为  $N_0$ .

定义  $\gamma_j, \gamma_{FD,c_j}, \gamma_{FD,D2D_i,l}$  为未被复用的蜂窝用户的信噪比、被复用蜂窝用户的信干噪比、D2D 的信干噪比,则在基站处接收到未复用信道的蜂窝用户的信噪比为

$$\gamma_j = \frac{p_{c_j} g_{c_j,BS}}{N_0} \quad 1 \leq j \leq N \quad (1)$$

基站处接收到的复用信道的蜂窝用户的信干比 SINR 为

$$\gamma_{FD,c_j} = \frac{p_{c_j} g_{c_j,BS}}{N_0 + \sum_{l=1}^2 I_{D2D_i,l}} \quad (2)$$

其中,

$$I_{D2D_i,l} = p_{D_{i,l}} g_{D_{i,l}} \quad 1 \leq j \leq N, 1 \leq i \leq M \quad (3)$$

D2D 用户的信干比为

$$\gamma_{FD,D2D_i,l} = \frac{p_{D_{i,l}} g_{i,l}}{N_0 + SI_{i,l} + I_{c_j,l}} \quad (4)$$

式中,  $z \in \{1, 2\}, z \neq l, 1 \leq i \leq M$ .

如果 D2D 通信处于半双工模式下(Half duplex),则

$$\gamma_{HD,c_j} = \frac{p_{c_j} g_{c_j,BS}}{N_0 + I_{D2D_i,l}} \quad (5)$$

同理

$$\gamma_{HD,D2D_i} = \frac{p_{D_{i,l}} g_{i,l}}{N_0 + I_{c_j}} \quad (6)$$

为了保证蜂窝用户和 D2D 用户的正常通信,链路的信干噪比要求不小于门限值,具体如下.

(1) 为了保证基站能正常接收到蜂窝用户的信

号,基站端接收到的蜂窝用户的信干噪比不小于一个门限值,假设该门限值为  $\gamma_{c, \text{thes}}$ , 则

$$\frac{p_{c_j} g_{c_j, \text{BS}}}{N_0 + \sum_{l=1}^2 I_{\text{D2D}, l}} = \gamma_{\text{FD}, c_j} \geq \gamma_{c, \text{thes}} \quad (7)$$

设通过上式求得第  $i$  对 D2D 用户中第  $l$  个 D2D 用户的最大发射功率为  $P_u$ , 那么  $p_{D_i, z} \leq P_u$

(2) 为了保证 D2D 用户的有效通信, D2D 用户接收端的信干噪比不小于门限值  $\gamma_{\text{D2D}, \text{thes}}$  即:

$$\frac{p_{D_i, z} G_i}{N_0 + S_{I_{i, l}} + I_{c_j, l}} \geq \gamma_{\text{D2D}, \text{thes}} \quad (8)$$

设通过上式求得第  $i$  对 D2D 用户中第  $l$  个 D2D 用户的最小发射功率为  $P_l$ :  $P_l \leq p_{D_i, z}$ .

由以上两式得到 D2D 用户对发送端的发送功率的取值范围为

$$p_{D_i, z} \in \begin{cases} \{P_l, \max(P_u, P_{\max})\}, P_l \leq P_u \\ \{P_u, \max(P_l, P_{\max})\}, P_u < P_l \end{cases} \quad (9)$$

$P_{\max}$  为所允许 D2D 用户发送端的最大发送功率.

根据上式在保证基站能正常接收到蜂窝用户的信号和 D2D 用户能正常通信的同时, 为了实现简单, 本文考虑一个蜂窝用户使用的信道资源最多只能给一对 D2D 用户复用, 以及一个 D2D 对只能复用一对蜂窝用户的信道资源的应用场景. 针对该应用场景, 我们定义一个  $N \times M$  的资源分配矩阵  $U_{N \times M} = [b_{i, j}]$  如下:

$$U_{N \times M} = \begin{Bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{N1} & b_{N2} & \cdots & b_{NM} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $b_{i, j} \in \{0, 1\}$ . 如果第  $i$  对 D2D 用户复用第  $j$  个蜂窝用户的上行链路资源, 则  $b_{i, j} = 1$ ; 否则,  $b_{i, j} = 0$ . 由上可以看出至少有  $(\max\{M, N\})!$  种不同的资源分配方案, 而不同的分配方案导致不同的系统吞吐量.

进一步, 我们建立全双工 D2D 通信场景下最大化系统吞吐量的优化模型如下:

$$\begin{aligned} \max \{ & (\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M b_{i, j} R_{i, j}) + \sum_{j=1}^N R_{c_j} (1 - \sum_{i=1}^M b_{i, j}) \} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^N b_{i, j} \leq 1, 1 \leq j \leq N \\ & \sum_{j=1}^M b_{i, j} \leq 1, 1 \leq i \leq N \\ & b_{i, j} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $R_{i, j}$  为第  $i$  对 D2D 用户复用第  $j$  个蜂窝用户的

信道资源时的吞吐量之和:

$$\begin{aligned} R_{i, j} &= \log_2(1 + \gamma_{\text{FD}, c_j}) + \sum_{l=1}^2 \log_2(1 + \gamma_{\text{D2D}, l}) \\ R_{c_j} &= \log_2(1 + \gamma_{c_j}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $1 \leq j \leq N, 1 \leq i \leq M, l \in \{1, 2\}, l \neq z$ .

这个最大化问题将通过下文中提到图论的方法来解决.

### 3 支持全双工 D2D 的最优资源分配算法

为了求解上述最大化问题, 本文从图论<sup>[8]</sup> 的角度考虑, 将研究的系统看作一个节点加权的无向二部图  $G = (V_1, V_2, W)$  来表示蜂窝用户和 D2D 对之间的关系. 二部图是一个简单的无向图, 其顶点集可以被分成两个互不相交的子集, 并且图中每条边所关联的顶点分别属于两个不同的子集. 若边子集的任意两条边在图中均不相邻则称为一个匹配, 边数最多的一个匹配为最大匹配. 图中与匹配中的边关联的点为饱和点, 若图中的点是最大匹配中的饱和点, 则称该匹配是完美匹配.

如图 2 所示, 图中有  $m$  对 D2D 用户和  $n$  个蜂窝用户. 顶点集  $V_1 = (x_1, x_2, \cdots, x_m)$  表示 D2D 用户对集合, 顶点集合  $V_2 = (y_1, y_2, \cdots, y_n)$  表示蜂窝用户的集合, 在图中每个顶点  $y_j \in V_2$  代表一个蜂窝用户, 每个顶点  $x_i \in V_1$  代表一对 D2D 用户, 边  $e_{x_i, y_j}$  表示 D2D 用户对  $x_i$  与蜂窝用户  $y_j$  共享信道资源, 边权  $w(x_i, y_j) \in W$  表示蜂窝用户  $y_j$  与 D2D 用户对  $x_i$  共享信道资源时的吞吐量之和, 即:  $w(x_i, y_j) = R_{i, j}$ . 若 D2D 用户对  $x_i$  与蜂窝用户  $y_j$  共享信道资源时, 基站不能正常接收到蜂窝用户的信号且 D2D 用户无法正常通信即不满足式 (5) 或者式 (6), 则边  $e_{x_i, y_j}$  不存在,  $w(x_i, y_j) = 0$ . 那么我们定义一个  $N \times M$  的边权矩阵  $W = [w_{i, j}]$  如下:

$$W = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1M} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NM} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

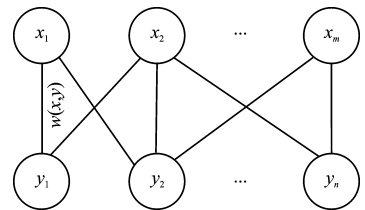


图 2 图论模型

最大权重匹配算法具体的分析参见文献[8]. 为了找到合适的  $U_{N \times M}$ , 基于图论的最优匹配算法的具体步骤如下.

(1) 基站端首先通过公共控制信道获得系统各个用户的信道冲击响应, 为后续各个用户信道资源分配提供信道状态信息.

(2) 将系统中的蜂窝用户等效为点集  $V_2$ , 预先给系统中的蜂窝用户分配无线资源, 并初始化各个参数.

(3) 加入 D2D 用户对后, 将 D2D 用户对等效为点集  $V_1$ , 基站端通过结合蜂窝用户 QoS 需求和 D2D 用户对通信门限值即(7) 和(8) 来选出可被 D2D 用户对复用的蜂窝信道资源, 并初始化各值.

(4) 在共用同一信道的蜂窝用户与 D2D 用户中各取一个点  $x_i, y_j$ , 并在点  $x_i$  与  $y_j$  之间连一条直线, 依次进行重复操作得到虚拟无加权二部图.

(5) 计算蜂窝用户和 D2D 信噪比之和  $w(x, y)$  构建虚拟矩阵  $W$ . 若  $w(x, y) = 0$  表示蜂窝用户信道资源不可被该对 D2D 用户复用, 并依此得到系统的虚拟加权二部图  $G$ .

(6) 基于虚拟加权二部图  $G$  和虚拟矩阵  $W$  下, 通过图论中的最优匹配分配信道资源. 算法如下.

```

1. Begin
2. 输入:  $W, U_{N \times M} = 0$ 
3. if (任取初始匹配  $M$  饱和于 D2D 用户集  $V_1$ )
4.   生成  $U_{N \times M}$ 
5.   Break
6. end if
7. go to (31)
8. else  $l(y_i) = 0, l(x_i) = \max(w(x_i, y_j))$ 
9.   if  $(l(x_i) + l(y_j) = \max(w(x_i, y_j)))$ 
       两点之间连一条直线, 依此构建等子图  $G_i$ 
10. 在  $G_i$  上执行匈牙利算法  $\rightarrow$  算法终止于  $S \subset V_1, T \subset V_2$ ,
     $N_{G_i}(S) = T \rightarrow M$ 
11.   if (匹配  $M$  饱和于 D2D 用户集  $V_1$ )
12.     生成  $U'_{N \times M}$ 
13.     Break;
14.   end if
15.   go to (31)
16. else
17.   for  $(i = 1; i \leq N; i++)$ 
18.     for  $(j = 1; j \leq M; j++)$ 
19.        $\alpha_i = \min\{l(x_i) + l(y_j) - w(x_i, y_j) \mid x_i \in S, y_j \in V_2 - T\}$ ;
20.     end for

```

```

21.   end for
22. if  $(u \in S)$ 
23.    $l'(u) = l(u) - \alpha_i$ ;
24. end if
25. if  $(u \in T)$ 
26.    $l'(u) = l(u) + \alpha_i$ ;
27. end if
28. else
29.    $l'(u) = l(u)$ 
30. 构建新的等子图  $G'_i$ , 执行匈牙利算法, 直至获得一个总
    权最大的完美匹配, 并生成一个资源分配矩阵  $U_{N \times M} =$ 
     $[b_{i,j}]$ , 否则转回(8) 重复操作.
31. end

```

#### 4 仿真分析

为了便于实现, 我们在单小区场景下对所提的算法进行仿真, 表 1 列出系统的仿真参数和算法初始值, 用户均匀分布在小区内, D2D 用户对随机分布在小区内. 本文将全双工最优资源分配算法和贪婪资源分配算法和干扰避免资源分配算法作为参考, 通过对比验证本算法的性能. 其中, 干扰避免资源分配算法表示只需满足式(7) 和式(8), 则随机分配资源; 而贪婪资源分配算法为依次为每个 D2D 用户对分配边权重最大的信道资源.

表 1 主要仿真参数

| 参数名           | 参数值                               |
|---------------|-----------------------------------|
| 小区半径          | 500 m                             |
| D2D 的最大通信距离   | 25 m                              |
| D2D 用户的最大发射功率 | 20 dBm                            |
| 白噪声功率谱密度      | -174 dBm/Hz                       |
| D2D 链路的路径损失   | $148 + 40 \log(d[\text{km}])$     |
| 蜂窝链路的路径损失     | $128.1 + 36.7 \log(d[\text{km}])$ |
| 系统带宽          | 10 MHz                            |
| 蜂窝用户发射功率      | 23 dBm                            |

图 3 以 10 个 D2D 用户对,  $\gamma_{c, \text{thes}} = 2$  dB 为例. 分别讨论在自干扰消除值为 110 dB 与 90 dB 两种情况下的对比. 可以看出, 随着蜂窝用户逐渐增加, 可复用的资源增加, 更多的 D2D 用户对接入系统, 系统的吞吐量随之增大. 由于贪婪资源分配算法只保证每对 D2D 用户复用边权重值最大, 并不能保证系统吞吐量最优. 而本文采用最优分配算法使资源获得最佳分配, 因此提高了系统的吞吐量.

图 4 以 10 个蜂窝用户,  $\gamma_{c, \text{thes}} = 2$  dB 为例. 在蜂窝用户数不变的情况下, 逐渐接入更多的 D2D 用户对, 以此分析 D2D 用户对的增加对系统吞吐量的影响. 通过图 4 可以看出, 随着 D2D 对数的增加, 系统

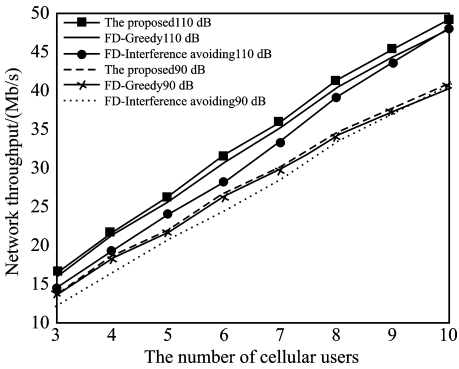


图 3 蜂窝用户的数量对系统容量的影响

频谱利用率提高,系统容量随之增大,但本文算法相比其他两种算法合理分配资源,获得了更高的系统容量.图 5 表示自干扰对系统吞吐量的影响对比.其中,10 个蜂窝用户,9 对 D2D 用户, $\gamma_{c,thes}=2$  dB.可以看出自干扰值增大,系统的吞吐量也随之增大.本文算法优于其他两种算法.

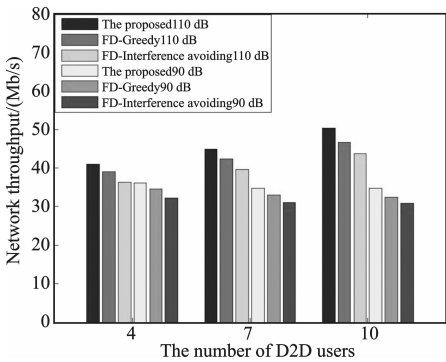


图 4 D2D 用户的增加对系统吞吐量的影响

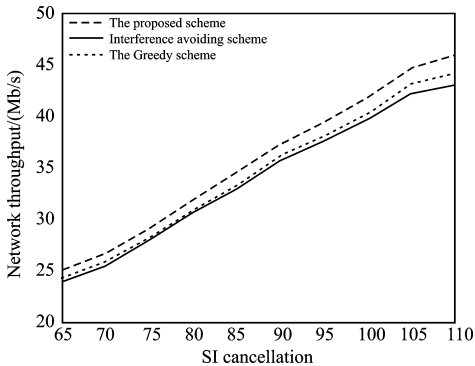


图 5 自干扰对系统吞吐量的影响

图 6 表示基站接收信号门限值对 FD/HD 值影响对比.其中,10 个蜂窝用户,10 对 D2D 用户,D2D 用户和蜂窝用户均为最大发射功率.两种模式下均采用本文算法获得 D2D 用户平均吞吐量并作比值.随着门限值增大,满足可复用的资源减少,系统性能

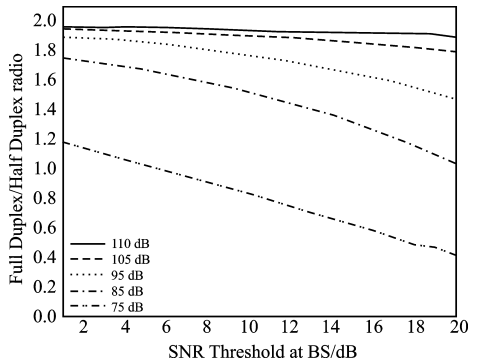


图 6 基站接收信号门限值对 FD/HD 值影响对比

下降.可以看出,自干扰消除值越大,全双工通信模式效果越好,在干扰消除值为 110 dB 时,接近半双工的 2 倍.

5 结束语

本文提出一种支持全双工 D2D 通信的资源分配方法,来解决蜂窝系统中蜂窝用户与 D2D 用户对共享资源的问题.该算法在保证蜂窝用户的正常服务质量下,同时考虑 D2D 用户对不同的服务需求的基础上,利用图论中的最大权重匹配的协调 D2D 用户对和蜂窝用户之间的资源分配,最大化了系统的吞吐量.仿真结果表明本算法可以有效提高系统的吞吐量,同时,验证了在自干扰消除值为 110 dB 时,全双工通信模式下的 D2D 链路吞吐量接近半双工 D2D 通信的两倍.但该研究局限于一对 D2D 用户对复用 一个蜂窝用户的资源进行通信,全双工 D2D 通信中的一个蜂窝用户共享多个蜂窝用户的资源的算法有待进一步研究.

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.

[3] Fodor G, Dahlman E, Mildn G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 47(12): 170-177.

[4] Sanghoon Kim, Stark W. Full duplex device-to-device communication in cellular networks[J]. //IEEE Computing, Networking and Communications (ICNC), 2014 International Conference on. Honolulu, HI: IEEE, 2014:721-725.

- Systems. Washington, DC, USA, IEEE, 2009: 135-143.
- [3] 黄山园. 基于颜色特征的图像检索技术研究[D]. 山西:山西大学,2013.
- [4] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International journal of computer vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [5] Jurie F, Triggs B. Creating efficient codebooks for visual recognition[C]//proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA: IEEE, 2005: 604-610.
- [6] Tang J L, He D J, Jing X, et al. Maize seedling/weed multiclass detection in visible/near infrared image based on SVM[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2): 97-103.
- [7] 汤慧. 多颜色空间融合的颜色特征提取方法及应用[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [8] De Campos T, Barnard M, Mikolajczyk K, et al. An evaluation of bags-of-words and spatio-temporal shapes for action recognition[C]//Applications of Computer Vision (WACV). Kona Hawaii: IEEE, 2011: 344-351.
- [9] Tamara L Berg, Alexander C Berg, Jonathan Shih. Automatic attribute discovery and characterization from noisy web data[C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision. Greece: IEEE, 2010.
- [10] Fan R E, Chang K W, Hsieh C J, et al. LIBLINEAR: A library for large linear classification[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2008, 9(1): 1871-1874.
- [11] Li P, Ma J, Gao S. Learning to summarize web image and text mutually[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Multimedia Retrieval. NY, USA: ACM, 2012.
- [12] Vedaldi A, Gulshan V, Varma M, et al. Multiple kernels for object detection[C]//Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on. Kyoto: IEEE, 2009: 606-613.

### 作者简介:

**李广丽** 女, (1978-), 硕士, 副教授. 研究方向为跨媒体检索、图像处理. E-mail: 791623700@qq.com.

**陈婧琳** 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为跨媒体检索.

**杨将** 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为无线网络优化.

**张红斌** 男, (1979-), 博士研究生, 副教授. 研究方向为图像标注、自然语言处理.

(上接第 146 页)

- [5] Ali, S. Rajatheva, N. Latva-aho, M. . Full duplex device to device communication in cellular networks[C]//IEEE Networks and Communications (EuCNC), 2014 European Conference on. Bologna: IEEE, 2014: 1- 5.
- [6] Han Yang , Rongqing Zhang, Xiang Cheng, Liuqing Yang , Resource sharing for device-to-device communications underlying full duplex cellular networks[C]//IEEE Communication Systems (ICCS). Baracoa: IEEE, 2014: 16-20.
- [7] Hemachandra K. T. Rajatheva, N. Latva-aho, M. Sum-rate analysis for full-duplex underlay device-to-device networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Santos: IEEE, 2014: 514-519.
- [8] Wenchi Cheng, Xi Zhang, Hailin Zhang. Optimal power allocation for full-duplex D2D communications over wireless cellular networks[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Caldera: IEEE, 2014: 4764-4769
- [9] 张清华, 陈六新, 李永红. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学, 2012.
- [10] Zhang Q H, Chen L X, Li Y H. graph theory and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 137-150.

### 作者简介:

**李云** 男, (1974-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为无线移动通信技术.

**杨雄(通讯作者)** 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为无线移动通信技术, D2D 通信技术.

E-mail: 1193522325@qq.com

**张乐** 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为 D2D 通信技术.

**夏威** 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为 LTE 网络资源分配与功率控制研究, D2D 通信技术.