

# 下含 D2D 蜂窝网基于有向加权二部图的资源分配

王振朝<sup>1,2</sup> 赵 云<sup>1</sup> 薛文玲<sup>1</sup>

(河北大学电子信息工程学院 保定 071002)<sup>1</sup> (河北省数字医疗工程重点实验室 保定 071002)<sup>2</sup>

**摘要** 针对蜂窝下含 D2D 系统最多允许一条蜂窝链路和一条 D2D 对链路同时共占信道的场景,旨在设计一种低复杂度的资源分配算法。首先将以最大化系统吞吐量为目标的资源分配问题归结为整数规划问题。考虑到干扰是决定两条链路能否共占信道的关键因素,将最优化问题转化为以最小化干扰链路信道增益为目标的问题;该问题可看作一对一偏好最优匹配问题,为此,首次提出有向加权二部图的相关概念,并用它对最优化问题建模。为了降低寻找最优匹配的难度,提出一种贪婪算法,该算法复杂度仅为  $O(n)$ 。仿真表明,与加权二部图算法相比,所提算法不仅在复杂度方面下降两个数量级,而且在一定范围内得到的系统吞吐量与容量等性能比加权二部图算法略优。

**关键词** D2D 通信,资源分配,图论

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.09.024

## Resource Allocation for D2D Communications Underlying Cellular Networks Using Directed Weighted Bipartite

WANG Zhen-chao<sup>1,2</sup> ZHAO Yun<sup>1</sup> XUE Wen-ling<sup>1</sup>

(Electronic Information Engineering College, Hebei University, Baoding 071002, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper aimed to design a resource allocation algorithm with low complexity in D2D underlaid cellular networks where at most one D2D pair and one cellular user can reuse a same channel. An integer program is formed to maximize throughput. Then it is transformed to an integer program to minimize the sum of interference channel gains, because interference is thought to be the most effective factor to decide whether two links can use a same channel. In order to solve the optimization problem which can be seen as a one-to-one matching problem, directed weighted bipartite and relative definitions were firstly proposed. Then, a greedy algorithm, whose complexity is only  $O(n)$ , was proposed to search optimal match pairs. Simulation results show that our algorithm can achieve better throughput and capacity than the weighted bipartite algorithm in certain range while the complexity is reduced two orders of magnitude.

**Keywords** Device-to-device communications, Resource allocation, Graph theory

## 1 引言

为了解决由高清视频流和社交媒体等高速数据通信业务发展带来的无线频谱资源匮乏的问题,近年来,有学者提出了蜂窝下含 D2D 系统(DUCN)<sup>[1]</sup>,通过将端对端(D2D)技术引入蜂窝网,两个近距离的用户设备可以绕过基站和核心网直接进行数据交换,从而降低蜂窝网的传输负担和时延,提高系统的频谱效率和容量,节省传输功率和通信费用,提升用户满意度<sup>[2]</sup>。虽然这种网络架构可以通过频谱复用的方式提高资源利用率,但同时也带来了同道干扰。为了保证用户的通信质量,降低同频干扰的影响至关重要<sup>[2]</sup>。

通过有效的资源分配来降低干扰的影响,同时实现系统多项性能指标的提升,是该领域当前的学术研究热点<sup>[3-5]</sup>。如文献[3]针对多条 D2D 对链路可以占用同一个 RB 且每个 D2D 对可以占用多个 RBs 的场景,提出了一种基于多对多匹

配博弈论的算法,并证明了该算法在有限次迭代中的收敛性。文献[4]针对将全双工技术引入 DUCN 系统而产生的复杂的干扰管理问题,提出采用图的着色理论联合分配 RBs 和传输功率的算法,且算法复杂度在可接受范围内。文献[5]假设基站仅能获得统计信道状态信息(PCSD),以最大化 D2D 对链路渐进加权和速率为目标来研究最优功率分配问题,通过分析目标函数的单调性,利用分枝定界算法求解。

在场景设置上,目前大多数研究工作仅考虑最多允许一条蜂窝(CE)链路和一条 D2D 对链路同时共占信道,同时每条 CE 链路都具有优先接入网络的权利<sup>[2,6-10]</sup>。如文献[6-8]分别采用二阶竞价、反向迭代联合竞价、斯特科尔伯格博弈等博弈论方法寻求最佳解决方案,然而博弈论方法具有许多缺陷<sup>[3]</sup>。实际上,这种优化问题可以看作一对一最优匹配问题,即利用空间距离、阴影衰落、功率控制等因素寻找相互干扰最低的优质配对组合,从而充分释放系统的各项性能。已

到稿日期:2017-03-13 返修日期:2017-05-12 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958-),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信,E-mail:1057442101@qq.com;赵 云(1989-),男,硕士生,主要研究方向为无线资源分配和蜂窝下含 D2D 系统;薛文玲(1975-),女,博士生,副教授,主要研究方向为网络通信。

有学者采用匹配理论进行资源分配。文献[9]基于二部图理论对系统建模,通过将 CE 链路 与 D2D 对链路共占信道相对于 CE 链路独占信道增加的吞吐量定义为边的加权值,利用匈牙利算法得到二部图的最佳匹配,但仅保证了 CE 链路的通信质量。文献[10]把该问题看作双向偏好匹配问题,运用 GS 单向求爱算法<sup>[11]</sup>求解,通过“求爱-接受”和“求爱-拒绝”的循环过程最终得到最佳匹配组合,然而该算法往往对“求爱方”是有利的,而“被求爱方”往往得不到最佳的输出结果,因此,匹配结果并非是全球最优的;为此,该文又给出最小加权算法<sup>[12]</sup>,这是一种改进的 GS 算法,通过交换男女双方的求爱身份获得全局最优配对组合,然而该算法复杂度极高,以至于该文中不能给出仿真结果。显然,在集中控制<sup>[1]</sup>场景中资源分配算法复杂度尤为重要,较低的算法复杂度能减少基站的资源调度负担,提高网络运行能力,而上述算法的复杂度最小也达到了  $O(n^8)$ 。

针对以上不足,关于最多允许一条 CE 链路和一条 D2D 对链路同时共占信道的场景,本文旨在设计一种低复杂度的资源分配算法。首先,在场景设置上,考虑 CE 链路 与 D2D 对链路在分配信道的优先权上无差别,仅根据链路接入信道可实现的传输速率决定是否为该链路分配信道,这种设置考虑了 DUCN 对用户的透明性<sup>[1]</sup>,将进一步释放系统的吞吐量;其次,首次提出有向加权二部图及其匹配的概念,使算法设计的过程清晰直观;再次,为了降低算法的复杂度,同时避免系统性能的严重恶化,将以最大化系统和速率为优化目标的优化问题转化为以最小化干扰信道增益为目标的问题,提出一种贪婪算法以寻找最优配对组合,该方法将降低网络信令开销,提高基站的资源调度能力;最后,进行仿真实验并分析所提算法的有效性。

## 2 系统模型

考虑单蜂窝小区上行链路的信道分配场景,频谱资源分割为  $K$  个带宽相等且互相正交的信道,上行蜂窝用户(CE)与 D2D 用户在小区中均匀分布。信道、蜂窝用户、D2D 用户分别记为  $\mathbf{K}=\{1,2,\dots,K\}$ ,  $\mathbf{C}=\{c_1,c_2,\dots,c_C\}$ ,  $\mathbf{D}=\{d_1,d_2,\dots,d_D\}$ ,相应的通信链路用相同符号表示。其中  $|\mathbf{K}|=K$ ,  $|\mathbf{C}|=C$ ,  $|\mathbf{D}|=D$ 。

由多径效应、阴影衰落、路径损耗决定的信道传输质量用信道增益  $g$  表示。分别用  $g_{i,B}^k, g_{j,i}^k$  表示第  $i$  个 CE 与基站(BS)、第  $j$  对 D2D 发送端与接收端占用信道  $k$  进行单工通信时的信道增益; $g_{j,B}^k, g_{i,j}^k$  分别表示第  $j$  对 D2D 发送端与 BS、第  $i$  个 CE 与第  $j$  对 D2D 接收端间干扰链路的信道增益。热噪声服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布。设 CE 终端(CUE)、D2D 对发送端(DUE)的发射功率分别为  $P_c$  和  $P_d$ 。二元变量  $\rho_l^k$  表示链路  $l$  对信道  $k$  的占用情况, $\rho_l^k=1$  表示占用, $\rho_l^k=0$  表示不占用。

假设每条通信链路最多占用一条信道,每条信道最多只能同时分配给一条 CE 链路和一条 D2D 对链路,那么基于系统吞吐量最大化的优化问题可表达为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{P}} \sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{l \in \mathbf{CUD}} (\rho_l^k R_l^k) & \quad (1) \\ \text{s. t. } \sum_{k \in \mathbf{K}} \rho_l^k \leq 1, \forall l \in \mathbf{CUD} & \quad (1a) \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in \mathbf{C}} \rho_i^k \leq 1, \sum_{j \in \mathbf{D}} \rho_j^k \leq 1, \forall k \in \mathbf{K} \quad (1b)$$

$$\gamma_i^k \geq \gamma_{th}^C, \forall i \in \mathbf{C} \quad (1c)$$

$$\gamma_j^k \geq \gamma_{th}^D, \forall j \in \mathbf{D} \quad (1d)$$

其中,  $\mathbf{P}$  是以  $\rho_l^k$  为元素的信道分配矩阵,  $R_l^k$  是用带宽归一化的香农公式  $R_l^k = \log_2(1 + \gamma_l^k)$  计算的链路  $l$  占用信道  $k$  进行通信时的信道传输速率。当 CE 链路  $c_i$  与 D2D 对链路  $d_j$  共占信道  $k$  时,  $\gamma_i^k = \frac{P_c g_{i,B}^k}{P_d g_{j,i}^k + \sigma^2}$ ,  $\gamma_j^k = \frac{P_c g_{j,i}^k}{P_d g_{j,i}^k + \sigma^2}$ ; 当  $c_i$  或  $d_j$  独占信道  $k$  时,  $\gamma_i^k = \frac{P_c g_{i,B}^k}{\sigma^2}$ ,  $\gamma_j^k = \frac{P_d g_{j,i}^k}{\sigma^2}$ 。限制条件(1a)表示每条链路最多占用一个信道,(1b)表示每个信道最多可同时分配给一条 CE 链路和一条 D2D 对链路,(1c)和(1d)表示只有信干噪比(SINR)高于门限值时才为该链路分配信道。

该式是一个非线性混合整数规划问题,无法采用常规方法求解。第 3 节将尝试对该式变形,并设计一种快速获得次优解的算法。

## 3 链路匹配算法

我们注意到:1)链路占用某信道进行通信时可实现的信道传输速率取决于 SINR;2)由于小区中各链路的通信质量相对保持不变,因此 SINR 取值的大小仅取决于干扰,包括不同链路同时占用相同信道进行通信时产生的同道干扰和环境中的热噪声,若忽略热噪声对 SINR 的影响,那么决定 SINR 的主要参量为同道干扰,而当通信设备的发射功率固定不变时,同道干扰仅取决于干扰信道增益。以上分析表明,可将式(1)转化为如下优化问题:

$$\min_{\mathbf{P}} \sum_{k \in \mathbf{K}} (\sum_{i \in \mathbf{C}} \rho_i^k g_{i,j}^k + \sum_{j \in \mathbf{D}} \rho_j^k g_{j,i}^k) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in \mathbf{K}} \rho_l^k \leq 1, \forall l \in \mathbf{CUD} \quad (2a)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{C}} \rho_i^k \leq 1, \sum_{j \in \mathbf{D}} \rho_j^k \leq 1, \forall k \in \mathbf{K} \quad (2b)$$

$$g_{i,j}^k \leq g_{th}^D \quad (2c)$$

$$g_{j,B}^k \leq g_{th}^C \quad (2d)$$

其中,  $g_{th}^D$  和  $g_{th}^C$  为  $c_i$  和  $d_j$  共占信道时干扰信道增益门限值,当(2c)和(2d)中任意条件不满足时,这对链路不能共占信道。

式(2)相对于式(1)具有以下特点:1)  $g$  的计算量比  $R$  的计算量减少了一半;2)式(2)所表示的最优化问题使得基站仅需获得干扰链路的信道状态信息,因此可节省网络的信令开销,提高运行能力。

式(2)本质上可以看作一个典型的具有若干限制条件的一对一最优匹配问题,即寻求一个 CE-D2D 匹配集合,使得该配对策略下系统的某项性能指标最优。下面提出有向加权二部图的相关概念,从而为设计寻求式(2)的解的算法提供理论依据。

### 3.1 基于有向加权二部图的问题建模

目前尚没有文献对有向加权二部图进行定义。为了便于求解式(2),本节提出有向加权二部图的相关定义,用它对式(2)表示的最优化问题建模,从而将其进一步转化成更简明的形式。

定义 1 设二部图<sup>[13]</sup>  $G=(V,E)$  中  $V$  的两个子集分别为  $X$  和  $Y$ 。若存在  $x \in X, y \in Y$ , 边  $e(x,y) \in E$  和  $e(y,x) \in E$  的权值不同,则称该二部图为有向加权二部图。

可以把式(2)表示的资源分配问题建立成有向加权二部图模型,该模型是一个“一对双偏好”匹配模型。如图1(a)所示,将CE链路集和D2D对链路集分别看作两个点集,箭头指向的对象及箭头的加权值反映了与某条链路配对意愿的强烈程度,如果两条链路之间没有箭头连接,则表示双方均没有配对意愿。本文中箭头的加权值用干扰信道增益来衡量,即

$$\begin{cases} w'_{ij} = g_{j,B}, & w' \text{ 越小, 配对请求越强烈。} \\ w_{ji} = g_{i,j} \end{cases}$$

**定义2** 设  $G' = (V', E')$  是有向加权二部图  $G$  的一个子图。若对于任意的  $e(a, b) \in E'$  必存在  $e(b, a) \in E'$ , 则称  $G'$  为由  $G$  导出的对称有向加权二部图。

如图1(b)所示,定义2与定义1的区别是前者不包含只有单向箭头的边,其含义是:对于CE链路  $c_i$  和D2D对链路  $d_j$ , 如果  $c_i$  对  $d_j$  的干扰较弱,而  $d_j$  对  $c_i$  的干扰较强,或者反之,那么二者也不能配对;只有它们相互均不对对方构成严重干扰时,才能组成一对同时共占信道的配对组合。

本文在提出有向加权二部图的定义时已注意到,在决定  $c_i$  与  $d_j$  能否共占信道时,干扰链路是影响配对意愿的主要因素。进一步,由于每个UE在小区中的地理位置的随机性,  $c_i$  发送端对  $d_j$  接收端是否构成干扰与  $d_j$  发送端对  $c_i$  接收端是否构成干扰之间具有相对不相关性。因此,有向加权二部图的构造是必不可少的。

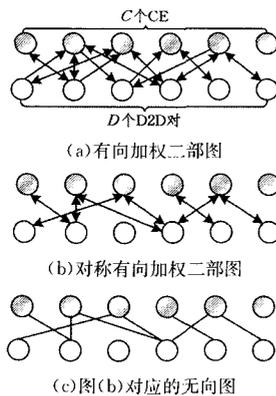


图1 有向加权二部图及相关图的示意图

接下来给出对称有向加权二部图最大权匹配的定义,该定义对应于式(2)的最优解向量集。

**定义3** 设  $M$  是  $G'$  的一个匹配<sup>[13]</sup>, 当且仅当  $M$  所有有向边的权重之和不小于  $G'$  的任意一个匹配的有向边权和时,称  $M$  是  $G'$  的最大权匹配。

**定理1** 对称有向加权二部图的最大权匹配等于其对应的加权二部图的最大权匹配。

图1(c)示出了对称有向加权二部图对应的无向图,本文将其权值定义为  $w_{ij} = w'_{ij} + w'_{ji}$ 。

经以上过程,可将式(2)转化为如下形式:

$$\min \sum_{i \in C} w_{ij} \text{ (或: } \min \sum_{j \in D} w_{ji} \text{)} \quad (3)$$

在从有向加权二部图到加权二部图的转化过程中,式(2)被简化成极简单的形式。

### 3.2 寻求最大权匹配的贪婪算法

可采用经典的匈牙利算法<sup>[13]</sup>或最小加权稳定匹配算法<sup>[12]</sup>得到式(3)的解。考虑到两种算法的复杂度均较高,分别为  $O(n^3)$  和  $O(n^4)$ ,  $n = \max\{C, D\}$ , 本节提出一种贪婪

算法。其基本步骤为:

第一步 从对称有向加权二部图对应的加权二部图的所有边中选择权值最小的边,该边连接的CE链路和D2D对链路构成一条匹配边,即这两条边同时共占信道不会对彼此产生严重干扰。为了保证通信质量,需判断信噪比是否达标,如式1(c)和式1(d),才能最终决定是否为此对链路分配信道。

第二步 在二部图中移除这两条链路对应的点及所有与之相关联的边;

第三步 重复第一步、第二步,直到所有的信道分配完毕或二部图剩余未匹配边的数量为0。

### 3.3 算法描述

算法1给出了本文提出的基于有向加权二部图算法的伪代码。其中第2-4行是基于有向加权二部图对式(2)表示的最优化问题建模的算法过程,第5-10行是用贪婪算法求解式(3)的算法步骤。若配对结束后,仍有空闲信道,将执行算法的第11行,根据SINR的大小为剩余的未配对链路逐个分配正交信道,直到所有信道均分配完毕。

**算法1** 基于有向加权二部图的链路匹配算法

1. input:  $C, D, K, g_{th}^D, g_{th}^C, w, M$ ;
2. for  $c_i \in C, d_j \in D$ ;
3. if  $g_{i,j}^k \leq g_{th}^D$ , and  $g_{j,i}^k \leq g_{th}^C$ ;
4. then  $w_{ij} = g_{i,j}^k + g_{j,i}^k, w \leftarrow w_{ij}$ ;
5. repeat;
6. find  $w_{ij}^* = \min\{w | w \in w\}$ ;
7. if  $\gamma_i^k \geq \gamma_{th}^C$  and  $\gamma_j^k \geq \gamma_{th}^D$ ;
8.  $M \leftarrow (c_i, d_j), w_i = +\infty, w_j = +\infty, K = K - 1$ ;
9. else  $w_{ij} = +\infty$ ;
10. until  $\min\{w | w \in w\} = +\infty$  or  $K = 0$ ;
11. if  $K \neq 0$ , 根据SINR的大小依次为未配对链路分配正交信道

### 3.4 算法分析

本文在算法设计上具有如下特点:1)通过深入分析得出干扰链路是影响DUCN系统信道分配的主要因素,并且在假设UE发射功率固定的前提下,首次将最小化系统的干扰信道增益作为优化目标;在计算复杂度上,由第2节可知,计算信道传输速率时除了需要计算两次拥有同样计算量的  $g$  (由于不同文献对  $g$  的计算方法不同<sup>[6-10]</sup>, 本文没有给出其计算量的确定值)之外,还要再进行两次乘法、三次加法、一次除法和一次对数运算,因此每计算一次干扰信道增益  $g_{i,B}^k$  或  $g_{j,i}^k$  的计算量比直接计算信道传输速率的计算量减少一半以上,与文献[9-10]相比,本文所提算法的计算复杂度大大降低。2)提出有向加权二部图的相关概念,不仅使最优化问题的转化过程清晰直观,而且通过缩小可配对链路的求解范围使加权二部图的最大权匹配算法的复杂度降低。3)提出一种求解加权二部图的最大权匹配的贪婪算法,其复杂度仅为  $O(n)$ ,  $n = \min\{C, D\}$ , 与匈牙利算法<sup>[13]</sup>与改进的匈牙利算法<sup>[9]</sup>相比下降了2个数量级,比最小加权稳定匹配算法<sup>[12]</sup>下降了3个数量级。

由于从式(1)到式(2)的变换并非等价过程,而且所提贪婪算法是一种次优的寻找最大权匹配的算法,因此本文算法复杂度的降低是以牺牲少量的系统吞吐量性能作为代价的。

## 4 仿真结果与分析

考虑系统带宽为10MHz,中心频率为2.3GHz。上行频

率资源被均分为  $K=10$  个信道。蜂窝用户数量与信道数量相等。蜂窝网用户和 D2D 用户在小区中均匀分布。D2D 接收用户均匀分布于发射用户周围 50m 的范围内。所有链路互相独立,且服从瑞利平坦衰落。基于 Matlab 平台进行仿真实验的具体参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

参数	取值
小区半径/m	500
D2D 对的数量	0,1,2,4,6,8,10,12,14, 16,18,20,25,30,35,40
SINR 门限值/dB	20
CUE,DUE 发射功率/dBm	23
噪声/dBm	-114
路径损耗	$U_{mi}^{[14]}$
阴影衰落	

利用本文算法得到的系统频谱效率和容量(系统同时容纳的通信链路量)与小区中 D2D 对的数量关系分别如图 2 和图 3 中带三角形的实线所示。对比曲线代表文献[9]的 WBG 算法,该算法用加权二部图对最优化问题建模,并用改进的快速匈牙利算法寻找匹配结果,算法复杂度为  $O(C^2 D)$ 。图中每个数据都是经过 500 次重复实验得到的统计平均结果。

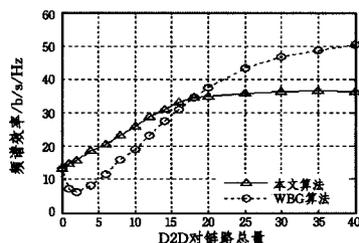


图 2 系统频谱效率

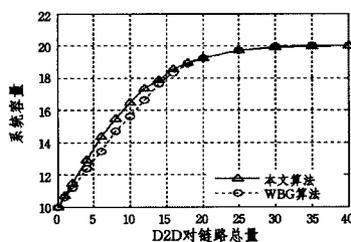


图 3 系统容量

理论上,从式(1)到式(2)的转化并非等价过程,且本文设计的贪婪算法也仅能得到次优的匹配结果,因此本文算法实现的吞吐量性能与 WBG 算法实现的吞吐量性能相比较差。然而从图 2 可以看出,当系统中 D2D 对链路总量小于 18 时,本文算法实现的系统频谱效率普遍高于 WBG 算法,差值最大可达  $9.65\text{b/s/Hz}$ 。这是因为:1)本文在场景设置上考虑了 CE 链路和 D2D 对链路在接入网络的优先权上没有差异,即当复用信道分配完毕后,系统将根据接入信道后可实现的传输速率大小决定是否剩余的某条链路分配剩余正交信道,这使得一些通信状况不佳的 CE 链路没有被分配信道;2) WBG 算法将 CE 链路和 D2D 对链路共占信道相对于 CE 链路独占信道可实现的吞吐量的增加值的最大化作为优化目标,仅保证了 CE 链路的通信质量,且将导致强烈通信信号对强烈干扰的抵消效应,对整个系统而言并非最佳。而当 D2D 对链路总量小于或等于 2 时,WBG 算法可实现的频谱效率随

着 D2D 对链路总量的增加而出现短暂下降,这也出于同样的原因。当系统中 D2D 对链路总量大于 18 时,本文算法实现的频谱效率基本不变,而 WBG 算法实现的频谱效率仍持续增加,这是因为本文算法虽然保证了共占信道的链路之间的干扰最少,但并没有充分考虑通信信道的传输质量,使得系统的吞吐量性能不能充分释放,导致系统出现拥塞;而 WBG 算法则充分利用了通信信道传输质量对系统吞吐量性能的挖掘能力。

由图 3 可知,在系统容量性能方面,本文算法与 WBG 算法产生的效果类似。值得注意的是,当系统中 D2D 对链路总量小于 18 时,本文算法实现的容量性能略高于 WBG 算法,最大相差为 0.91。这是因为面对相互干扰很小且通信信道传输质量相对不佳的一对链路时,本文算法倾向于为其分配共占信道,而 WBG 算法则恰好相反,因此,本文算法能使系统同时容纳更多的接入用户量。

**结束语** 针对蜂窝下含 D2D 系统最多允许一条 CE 链路和一条 D2D 对链路同时共占信道的场景,本文提出了有向加权二部图的相关理论,并对优化问题建模,设计了一种低复杂度的信道分配算法。该算法的复杂度仅为  $O(n)$ ,相较于匈牙利算法的复杂度下降了两个数量级,该项性能使得本文算法在对密集用户蜂窝网络资源的调度上具有应用潜力。仿真结果表明,本文算法在一定范围内实现的系统性能与加权二部图算法相比相差不大且略有优势。然而,由于对通信链路传输质量的利用不足,当系统中 D2D 对数量较大时,本文算法不能充分释放系统的吞吐量性能。

## 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] QIAN C, QIAN L P, WU H, et al. System throughput optimization for hybrid device-to-device cellular networks[J]. Computer Science, 2016, 43(1): 145-148, 177. (in Chinese)  
钱程, 钱丽萍, 武航, 等. 混合 D2D 蜂窝网络的系统吞吐量优化[J]. 计算机科学, 2016, 43(1): 145-148, 177.
- [3] ZHAO J, LIU Y, CHAI K K, et al. Many-to-many matching with externalities for device-to-device communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(1): 138-141.
- [4] 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): 1-6.
- [5] TANG H, DING Z. Monotonic optimization for power control of D2D underlay with partial CSI[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [6] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. A two-phase auction-based fair resource allocation for underlying D2D communications[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [7] WANG F, XU C, SONG L, et al. Energy-efficient radio resource and power allocation for device-to-device communication underlying cellular networks[C]// International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Huangshan, 2012: 1-6.

- [8] YIN R, YU G D, ZHONG C J, et al. Distributed resource allocation for D2D communication underlying cellular networks[C]// IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Budapest, 2013: 138-143.
- [9] ZHANG H, WANG T, SONG L, et al. Graph-based resource allocation for D2D communications underlying cellular networks [C]// IEEE/CIC International Conference on Communications in China-Workshops (CIC/ICCC). Xi'an, 2013: 187-192.
- [10] GU Y, ZHANG Y, PAN M, et al. Matching and cheating in device to device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(10): 2156-2166.
- [11] GALE D, SHAPLEY L S. College admissions and the stability of marriage[J]. American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9-15.
- [12] IRVING R W, LEATHER P, GUSFIELD D. An efficient algorithm for the "optimal" stable marriage[J]. Journal of the ACM, 1987, 34(3): 532-543.
- [13] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 189-202.
- [14] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced; ITU-RM. 2135-1[R]. 2009.

(上接第98页)

在更短的时间内获得更好的优化精度和更快的收敛速度,以便将更多的搜索过程留给差分进化算法,有利于其对复杂优化问题的处理;然后通过采用自适应调节参数的差分策略来进一步提高算法对复杂优化函数的寻优性能,实现算法之间的优势互补,获得了一种全局搜索能力和局部搜索能力兼顾的高效混合优化算法。实验结果表明, GWO 具有更快的收敛速度、更好的寻优性能和更强的普适性,更适用于求解各种函数优化问题。

### 参考文献

- [1] JIANG J Q, BO Y L, SONG C Y, et al. Hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial fish swarm algorithm [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7367: 607-614.
- [2] LI Q, ZHAO C, CHEN P, et al. Improved ant colony optimization based on particle swarm optimization [J]. Control and Decision, 2013, 28(6): 873-878. (in Chinese)  
李擎, 张超, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 873-878.
- [3] BEHNAMIAN J, ZANDIEH M, FATEMI G S M T. Parallel machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(6): 9637-9644.
- [4] ZHANG X M, TU Q, YIN X X, et al. Chemotaxis operator embedded particle swarm optimization algorithm and its application to multilevel thresholding[J]. Computer Science, 2016, 43(2): 311-315. (in Chinese)  
张新明, 涂强, 尹欣欣, 等. 嵌入趋化算子的 PSO 算法及其在多阈值分割中的应用[J]. 计算机学报, 2016, 43(2): 311-315.
- [5] ZHOU Y L. Hybrid strategy of intelligent optimization algorithm; analysis, design and model [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(12): 4423-4426. (in Chinese)  
周雅兰. 智能优化算法的混合策略分析、设计和建模[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4423-4426.
- [6] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [7] MIRJALILI S. How effective is the grey wolf optimizer in training multi-layer perceptrons[J]. Applied Intelligence, 2015, 43(1): 150-161.
- [8] SULAIMAN M H, MUSTAFFA Z, MOHAMED M R, et al. Using the grey wolf optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem [J]. Applied Soft Computing, 2015, 32: 286-292.
- [9] SONG H M, SULAIMAN M H, MOHAMED M R. An application of grey wolf optimizer for solving combined economic emission dispatch problems [J]. International Review on Modelling and Simulations, 2014, 7(5): 838-844.
- [10] LONG W, ZHAO D Q, XU S J. Improved grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problem [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(9): 2590-2595. (in Chinese)  
龙文, 赵东泉, 徐松金. 求解约束优化问题的改进灰狼优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(9): 2590-2595.
- [11] GAO Y L, LIU J M. Dynamic differential evolution algorithm with random mutation [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(10): 2719-2722. (in Chinese)  
高岳林, 刘俊梅. 一种带有随机变异的动态差分进化算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2719-2722.
- [12] PILOT M, BRANICKI W, JEDRZEJEWSKI W, et al. Phylogeographic history of grey wolves in Europe [J]. BMC Evolutionary Biology, 2010, 10(1685): 1-11.
- [13] MURO C, ESCOBEDO R, SPECTOR L, et al. Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations [J]. Behavioural Processes, 2011, 88(3): 192-197.
- [14] DRAA A, BOUZOUBIA S, BOUKHALFA I. A sinusoidal differential evolution algorithm for numerical optimization [J]. Applied Soft Computing, 2015, 27: 99-126.
- [15] LI J Y, WANG Y, LI C L. Particle Swarm Optimization Algorithm with Double-Flight Modes [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(6): 533-539. (in Chinese)  
李景洋, 王勇, 李春雷. 采用双模飞行的粒子群优化算法[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(6): 533-539.
- [16] NAIK M, NATH M R, WUNNAVA A, et al. A new adaptive Cuckoo search algorithm [C]// 2015 IEEE 2nd International Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS). IEEE, 2015: 1-5.
- [17] HAKLI H, UGUZ H. A novel swarm optimization algorithm with Levy flight [J]. Applied Soft Computing, 2014, 23(5): 333-345.
- [18] TANWEER M R, SURESH S, SUNDARARAJAN N. Self regulating particle swarm optimization algorithm [J]. Information Sciences, 2015, 294: 182-202.