

## D2D网络中信道选择与功率控制策略研究

钱志鸿<sup>①</sup> 田春生<sup>①</sup> 王鑫<sup>①②</sup> 王雪<sup>\*①</sup>

<sup>①</sup>(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

<sup>②</sup>(吉林农业大学信息技术学院 长春 130018)

**摘要:** 针对D2D通信的资源分配问题, 该文研究了D2D信道选择与功率控制策略。在保证蜂窝用户服务质量(QoS)的前提下, 提出一种基于启发式的D2D信道选择算法, 为系统内的D2D用户找到合适的信道复用资源。同时, 利用拉格朗日对偶方法求解得到D2D用户最优传输功率。仿真结果表明当蜂窝用户与多对D2D用户共享信道资源时能够大幅度提升系统平均吞吐量。在相同条件下, 该算法的性能要明显优于现有算法。

**关键词:** D2D通信; 信道选择; 功率控制; 拉格朗日对偶

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)10-2287-07

DOI: 10.11999/JEIT190149

## Research on Channel Selection and Power Control Strategy for D2D Networks

QIAN Zhihong<sup>①</sup> TIAN Chunsheng<sup>①</sup> WANG Xin<sup>①②</sup> WANG Xue<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

<sup>②</sup>(College of Information & Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130018, China)

**Abstract:** Considering the resource allocation problem for Device-to-Device (D2D) communications, a channel selection and power control strategy for D2D communications is investigated. On the premise of guaranteeing the Quality of Service (QoS) of cellular users, a heuristic based D2D channel selection algorithm is proposed to find the suitable channel reusing resources for D2D users in the system. At the same time, the optimal transmission power of D2D users is obtained by using the Lagrange dual method. Simulation results demonstrate that when the cellular user shares channel resources with multiple pairs of D2D users, the system throughput can be dramatically improved. The performance of this algorithm outperforms the exiting algorithms under the same conditions.

**Key words:** D2D communications; Channel selection; Power control; Lagrange dual

### 1 引言

随着无线通信技术的迅猛发展以及智能终端设备的快速普及, 如何在网络流量呈现指数级增长的情况下, 使大规模网络终端得到快速有效的接入是目前亟待解决的关键问题<sup>[1]</sup>, D2D(Device-to-Device)通信技术以其灵活高效的通信方式而备受关注<sup>[2]</sup>。D2D用户设备(D2D User Equipments,

DUEs)通过复用授权频带内的信道资源, 在提升系统吞吐量, 提高频谱资源利用率的同时也对系统内原有蜂窝用户设备(Cellular User Equipments, CUEs)造成了干扰<sup>[3]</sup>, 因此, 如何合理分配资源, 设计一种行之有效的资源管理与干扰消除机制来协调DUEs与CUEs之间的干扰是目前研究的重点与难点所在<sup>[4]</sup>。

Xiang等人<sup>[5]</sup>在D2D与IMT-Advanced混合网络内提出了一种干扰消除策略, 在保证CUEs最小通信需求的前提下为DUEs选择最佳传输模式, 使系统的吞吐量达到最大值。不同于集中式控制的思想, 有研究人员提出利用分布式算法为D2D通信分配合理的资源, 其中, Wen等人<sup>[6]</sup>提出一种基于博弈论的分布式DUEs资源复用机制, 并证明了纳什均衡解的收敛性; Lee等人<sup>[7]</sup>首先提出一种分布式的资源管理框架, 随后在此框架下利用列生成算法

收稿日期: 2019-03-14; 改回日期: 2019-05-23; 网络出版: 2019-05-28

\*通信作者: 王雪 jluwangxue@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771219), 吉林大学基础科研项目(SXGJQY2017-9, 2017TD-19), 吉林大学研究生创新基金(101832018C022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771219), The Fundamental Research of Jilin University (SXGJQY2017-9, 2017TD-19), The Graduate Innovation Fund of Jilin University (101832018C022)

对问题进行了求解。Zhang等人<sup>[8]</sup>在权衡系统吞吐量与DUEs相互干扰的情况下,考虑DUEs功率控制问题,提出了一种干扰避免与资源管理算法。Wang等人<sup>[9]</sup>则进一步分析了DUEs接入概率与各设备间信道增益的关系,提出了一种基于贪婪思想的启发式资源分配方法,提升了DUEs的接入成功率及系统吞吐量。Ahmad等人<sup>[10]</sup>在认知辅助的D2D系统中,通过引入基于网格自适应的直接搜索算法来解决相关的资源管理问题。上述研究分别从不同角度解决了D2D网络中的资源分配问题,但通常仅考虑了系统内单个CUE仅能够与单对DUE复用信道资源的限制条件,这样不仅限制了D2D通信技术的使用前景,同时也使得系统性能远远达不到最优的水平。

本文在现有研究成果的基础上,针对系统内单个CUE能够与多对DUEs共享信道资源的通信场景,以最大化系统平均吞吐量为优化目标,提出了一种D2D信道选择与功率控制策略。首先,利用启发式思想提出了一种复杂度较低的D2D信道选择策略,为系统内的DUEs找到合适的CUEs共享信道资源;接下来针对DUEs的功率控制问题,构建了拉格朗日对偶函数,利用库恩塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件对问题进行了求解,得到了DUEs的最优传输功率。仿真结果表明与CUE仅能够与单对DUE共享信道资源相比,本文算法能够大幅度提高系统平均吞吐量,提升网络性能。

## 2 系统模型及问题描述

### 2.1 系统模型

本文主要研究未来大规模通信过程中D2D通信的信道选择与功率控制问题,系统模型如图1所示。通信网络由 $M$ 个CUEs与 $N$ 对DUEs组成,分别使用集合 $C$ 与集合 $D$ 进行表示,即 $C = \{1, 2, \dots, M\}$ 以及 $D = \{1, 2, \dots, N\}$ 。本文所考虑的网络是一个全负载网络,即网络内所有的信道资源被 $M$ 个CUEs占用,因此系统内的DUEs只能通过复用被CUEs占用的信道资源进行通信<sup>[11]</sup>。与此同时,由于蜂窝网络上行通信链路的频谱利用率要低于下行

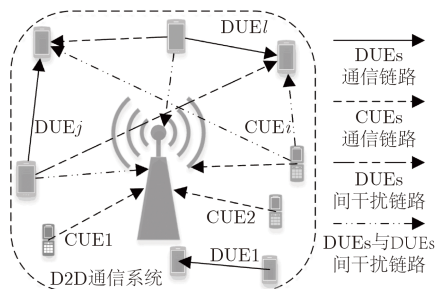


图1 系统模型

链路,并且与复用下行通信链路相比在复用上行通信链路时D2D接收端所受到的干扰会较小,因此本文集中考虑DUEs复用CUEs上行通信链路的情景。通信网络内的演进型基站(evolved Node B, eNB)能够采集网络内所有通信链路的瞬时信道状态信息(Channel State Information, CSI)以及网络内所有通信用户的服务质量(Quality of Service, QoS)需求。本文定义 $\xi_i^j$ 表示DUE  $j$ 与CUE  $i$ 的信道资源复用指示因子,当DUE  $j$ 复用CUE  $i$ 的信道资源时, $\xi_i^j = 1$ ;其他情况下 $\xi_i^j = 0$ 。定义 $D_i$ 表示复用CUE  $i$ 信道资源的DUEs集合。

由图1可知,当DUE  $j$ 与DUE  $l$ 同时复用CUE  $i$ 的信道资源时,不仅CUE与DUE间存在干扰,DUE之间同样存在着干扰,因此CUE  $i$ 与DUE  $j$ 的信噪比(Signal to Interference-plus-Noise Ratio, SINR)可以分别表示为

$$\gamma_{i,j}^c = \frac{P^c g_i^c}{\sigma_0^2 + \sum_{j \in D} \xi_i^j P_{j,i}^d g_{j,i}^d} \quad (1)$$

$$\gamma_{j,i}^d = \frac{P_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_0^2 + \sum_{i \in C} \xi_i^j P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D, l \neq j} P_{l,i}^d g_{l,j}^d} \quad (2)$$

其中, $P^c$ 表示CUE传输功率,是一个定值。 $P_{j,i}^d$ 表示当DUE  $j$ 复用CUE  $i$ 信道资源时DUE  $j$ 的传输功率。 $g_i^c$ 表示从CUE  $i$ 到eNB的信道功率增益, $g_j^d$ 表示DUE  $j$ 发射端到接收端的信道功率增益, $g_{j,i}^d$ 表示从DUE  $j$ 发射端到eNB的信道功率增益, $g_{i,j}^c$ 表示从CUE  $i$ 到DUE  $j$ 接收端的信道功率增益, $g_{l,j}^d$ 表示DUE  $l$ 发射端与DUE  $j$ 接收端之间的信道功率增益。 $\sigma_0^2$ 表示加性高斯白噪声功率。

### 2.2 问题描述

本文将D2D通信中的信道选择与功率控制问题转换为非线性约束条件下的联合优化问题,旨在最大化网络的吞吐量。上述优化问题的数学表达式可以归纳为

$$\max_{P_{j,i}^d, \xi_i^j} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \left\{ B_c \log_2 (1 + \gamma_{i,j}^c) + \xi_i^j B_c \log_2 (1 + \gamma_{j,i}^d) \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \gamma_{i,j}^c \geq \gamma_{\text{th}}, \forall i \in C, j \in D \quad (4)$$

$$0 \leq P_{j,i}^d \leq P_{\text{max}}^d, \forall i \in C, \forall j \in D \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} \xi_i^j \leq 1, \forall j \in D \quad (6)$$

$$\xi_i^j \in \{0, 1\}, \forall i \in C, \forall j \in D \quad (7)$$

其中,  $B_c$ 表示信道带宽。式(4)中 $\gamma_{th}$ 表示CUE  $i$ 通信不被干扰所需要满足的最小SINR。 $P_{max}^d$ 表示DUE最大传输功率,式(5)表示DUE传输功率不应超过限定阈值。式(6)是为了保证系统内干扰可控,限制通信系统内每一对DUE最多只能复用1个CUE的信道资源。

### 3 信道选择与功率控制策略

由于优化问题式(3)–式(7)是一个混合整数非线性规划(Mixed Integer Non-Linear Programming, MINLP)问题且具有非确定多项式(Non-deterministic Polynomial, NP)困难属性,因此,接下来本文将该问题拆分成DUEs信道选择与DUEs功率控制两个子问题分别进行求解。

#### 3.1 DUEs信道选择策略

首先考虑DUE  $j$ 复用CUE  $i$ 信道资源时,为了使复用后的吞吐量达到最大值,最优化问题可以被描述为

$$\max_{P_{j,i}^d} T(P_{j,i}^d) = \{B_c \log_2 [(1 + \gamma_i^c) (1 + \gamma_j^d)]\} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{j,i}^d \leq P_{max}^d, \forall i \in C, \forall j \in D \quad (9)$$

式(8)中 $\gamma_i^c = [1 + P^c g_i^c / (\sigma_0^2 + P_{j,i}^d g_{j,i}^d)]$ ,  $\gamma_j^d = [1 + P_{j,i}^d g_j^d / (\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c)]$ 。式(9)中 $P_{max}^d$ 表示DUEs的传输功率限制,由式(1)、式(4)及式(5)能够得到当DUE  $j$ 复用CUE  $i$ 信道资源时,  $P_{max}^d$ 的值可以表示为

$$P_{max}^d = \min \left\{ P_{max}^d, \frac{P^c g_i^c}{\gamma_{th} g_{j,i}^d} - \frac{\sigma_0^2}{g_{j,i}^d} \right\} \quad (10)$$

通过式(8)能够得到函数 $T(P_{j,i}^d)$ 是一个关于自变量 $P_{j,i}^d$ 的凸函数,优化问题式(8)和式(9)是一个凸问题<sup>[8,12]</sup>。因此,优化问题式(8)和式(9)的最优解能够表示为

$$P_{j,i}^{dopt} = \left[ -\mu \pm \sqrt{(\mu)^2 - \nu} \right]_0^{P_{max}^d} \quad (11)$$

其中,  $[x]_0^{P_{max}^d}$ 表示变量 $x$ 在区间 $[0, P_{max}^d]$ 内的投影,变量 $\mu$ 与变量 $\nu$ 的值可以分别表示为

$$\mu = \frac{\sigma_0^2}{g_{j,i}^d} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{g_j^d \sigma_0^4 + P^c g_i^c \sigma_0^2 (g_j^d - g_{j,i}^d) - (P^c)^2 g_i^c g_{i,j}^c g_{j,i}^d}{g_j^d (g_{j,i}^d)^2} \quad (13)$$

本文接下来提出一种基于启发式思想的DUEs信道选择算法,为系统内的DUEs分配合适的信道复用资源,保证复用后的吞吐量达到最大值,DUEs信道选择算法的具体步骤如表1所示。

#### 3.2 DUEs功率控制策略

考虑到通信系统内所有CUEs的传输功率均为定值,因此只需考虑如何在系统内DUEs最小QoS需求的限制下,设计合理的DUEs功率控制策略使得系统内DUEs吞吐量达到最大值即可<sup>[13]</sup>。根据前文定义可知集合 $D_i$ 由复用CUE  $i$ 信道资源的DUEs所组成,因此对于某一特定的集合 $D_i, \forall i \in C$ , DUE  $j$ 的功率控制问题能够被表述为

$$\max_{P_{j,i}^d} \sum_{j \in D_i} B_c \log_2 \left( 1 + \frac{P_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} P_{l,i}^d g_{l,i}^d} \right) \quad (14)$$

表1 基于启发式思想的DUEs信道选择算法

- (1)初始化:  $D_i = \emptyset, \forall i \in C; M_i = D, \forall i \in C; \xi_i^j = 0, \forall i \in C, \forall j \in D$ ; 利用式(11)得到所有DUEs最优的发射功率 $P_{j,i}^{dopt}$ ,并求解出与之相对应的 $T(P_{j,i}^{dopt})$ 值;
- (2) repeat
- (3)  $(i^*, j^*) = \arg \max_{(i,j): i \in C, j \in M_i} T(P_{j,i}^{dopt})$  // 求解得到吞吐量最大值所对应的CUE $i^*$ 与DUE $j^*$ ;
- (4) if  $\left[ \frac{P^c g_{i^*}^c}{\left( \sigma_0^2 + \sum_{q \in \{D_{i^*} \cup \{j^*\}} P_{q,i^*}^{dopt} g_{q,i^*}^d \right)} \right] \geq \gamma_{th}$  then // 判断DUE $j^*$ 复用CUE $i^*$ 信道资源时, CUE $i^*$ 的SINR是否满足系统限制条件, 当满足限制条件时:
  - (5) set  $\xi_{i^*}^{j^*} = 1$ ; // 将复用指示因子 $\xi_{i^*}^{j^*}$ 的值设置为1;
  - (6)  $M_i = M_i \setminus \{j^*\}, \forall i \in C; D_{i^*} = D_{i^*} \cup \{j^*\}$ ; // 将DUE $j^*$ 从集合 $M_i$ 中删除,同时将DUE $j^*$ 加入到复用CUE $i^*$ 信道资源的DUEs集合 $D_{i^*}$ 中;
  - (7) else // 当不满足限制条件时:
    - (8)  $M_{i^*} = M_{i^*} \setminus \{j^*\}$ ; // 将DUE $j^*$ 从集合 $M_{i^*}$ 中删除;
    - (9) end if
  - (10) until  $M_i = \emptyset, \forall i \in C$  // 当集合 $M_i$ 为空集时停止运行;
  - (11) return  $D_i, \forall i \in C; \xi_i^j, \forall i \in C, \forall j \in D$ . // 输出集合 $D_i$ 及复用指示因子 $\xi_i^j$ 的值。

$$\text{s.t. } T_{j,i}^d = B_c \log_2 \left( 1 + \frac{P_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} P_{l,i}^d g_{l,j}^d} \right) \geq T_{j,\min}^d, \forall j \in D_i \quad (15)$$

$$0 \leq P_{j,i}^d \leq P_{j,i}^{\text{d-max}}, \forall j \in D_i \quad (16)$$

式(15)中  $T_{j,i}^d$  表示DUE  $j$  所获得的吞吐量,  $T_{j,\min}^d$  表示为了保证DUE  $j$  通信所需要满足的最小吞吐量。约束条件式(15)确保了集合  $D_i$  内的每一个DUE都能够满足其最小的吞吐量需求, 约束条件式(16)保证了每一个DUE的传输功率都不会超过规定的阈值,  $P_{j,i}^{\text{d-max}}$  的值可以表示为

$$P_{j,i}^{\text{d-max}} = \min \left\{ P_{\max}^d, \frac{P^c g_i^c}{\gamma_{\text{th}} g_{j,i}^d} - \frac{\sigma_0^2}{g_{j,i}^d} - \sum_{l \in D_i, l \neq j} \frac{P_{l,i}^d g_{l,i}^d}{g_{j,i}^d} \right\} \quad (17)$$

通过式(14)能够得到, 当系统内DUEs的SINR处于较高状态时, DUEs的吞吐量计算式(14)可以被转化为

$$\sum_{j \in D_i} T_{j,i}^d = \sum_{j \in D_i} B_c \log_2 \left( \frac{P_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} P_{l,i}^d g_{l,j}^d} \right) \quad (18)$$

接下来, 本文定义  $P_{j,i}^d = e^{\zeta_{j,i}^d}$ , 将其代入式(18)中能够得到

$$\begin{aligned} \sum_{j \in D_i} T_{j,i}^d &= \sum_{j \in D_i} B_c \log_2 \left( \frac{e^{\zeta_{j,i}^d} g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} e^{\zeta_{l,i}^d} g_{l,j}^d} \right) \\ &= \frac{B_c}{\ln(2)} \sum_{j \in D_i} \left( \frac{\zeta_{j,i}^d}{\ln(10)} + \lg(g_j^d) - \lg \left( \sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} e^{\zeta_{l,i}^d + \ln(g_{l,j}^d)} \right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)是一个凸函数<sup>[14]</sup>, 因此优化问题式(14)–式(16)可以被转化为一个凸优化问题, 为了求解该优化问题, 本文定义拉格朗日对偶函数为

$$\begin{aligned} L(\zeta_{j,i}^d, \eta_j, \lambda_j) &= \frac{B_c}{\ln(2)} \sum_{j \in D_i} \ln \left( \frac{e^{\zeta_{j,i}^d} g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} e^{\zeta_{l,i}^d} g_{l,j}^d} \right) - \sum_{j \in D_i} \lambda_j \left( e^{\zeta_{j,i}^d} - P_{j,i}^{\text{d-max}} \right) \\ &\quad + \frac{B_c}{\ln(2)} \sum_{j \in D_i} \eta_j \left( \ln \left( 1 + \frac{e^{\zeta_{j,i}^d} g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} e^{\zeta_{l,i}^d} g_{l,j}^d} \right) - T_{j,\min}^d \right) \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中  $\eta_j$  和  $\lambda_j$  表示拉格朗日乘法因子, 通过KKT条件, 本文能够得到DUE  $j$  的最优传输功率为

$$P_{j,i}^d = \left[ \frac{1 + \eta_j}{\sum_{l \in D_i, l \neq j} \left( g_{j,l}^d (1 + \lambda_l) / \left( \sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{k \in D_i, k \neq l} P_{k,i}^d g_{k,l}^d \right) \right)} + \frac{\lambda_j}{B_c} \ln(2) \right]^+ \quad (21)$$

式(21)中  $[x]^+ = \max(0, x)$ , 拉格朗日乘法因子  $\eta_j$  和  $\lambda_j$  可以使用次梯度迭代算法进行最优搜索表示为

$$\eta_j^{t+1} = \left[ \eta_j^t + \alpha \left( T_{j,\min}^d - B_c \log_2 \left( \frac{P_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_0^2 + P^c g_{i,j}^c + \sum_{l \in D_i, l \neq j} P_{l,i}^d g_{l,j}^d} \right) \right) \right]^+, \forall j \in D_i \quad (22)$$

$$\lambda_j^{t+1} = [\lambda_j^t - \beta (P_{j,i}^{\text{d-max}} - P_{j,i}^d)]^+, \forall j \in D_i \quad (23)$$

其中,  $\alpha$  与  $\beta$  分别表示拉格朗日乘法因子  $\eta_j$  和  $\lambda_j$  的迭代步长,  $t$  表示迭代次数。综上所述, 本文通过对拉格朗日对偶函数的求解得到了DUEs的最优传输功率, DUEs功率控制算法具体步骤如表2所示。

### 3.3 复杂度分析

本文所提D2D信道选择与功率控制策略的复杂度分析可以分为两个阶段, 在DUEs信道选择阶段, 需要完成  $MN$  个复杂度为  $O(1)$  信道选择问题的



表 2 DUEs功率控制算法

(1) 根据表1对集合 $D_i, \forall i \in C$ 进行初始化;
(2) for all $i \in C$ do
(3) for all $j \in D_i$ do
(4) 根据式(21)–式(23)计算DUE $j$ 传输功率 $P_{j,i}^d$ 。
(5) end for
(6) end for
(7) return $P_{j,i}^d, \forall i \in C, \forall j \in D$ . // 输出DUEs最优传输功率。

求解, 因此, DUEs信道选择阶段的算法复杂度为 $O(MN)$ 。在DUEs功率控制阶段, 每一次迭代运算最多需要完成 $MN$ 个复杂度为 $O(1)$ 功率控制问题的求解, 因此, DUEs功率控制阶段的算法复杂度为 $O(TMN)$ , 其中 $T$ 为总的迭代次数。综上, 本文所提DUEs信道选择与功率控制策略总的算法复杂度为 $O((T+1)MN)$ 。

### 4 仿真结果与分析

为了验证本文算法的性能, 接下来在MATLAB仿真平台中对其进行仿真分析。仿真中设置小区为半径250m的正六边形, 系统内CUEs与DUEs随机分布在小区当中, 信道带宽为180kHz。CUEs通信链路和DUEs通信链路的阴影衰落服从均值为0, 标准差分别为10dB与12dB的对数正态分布。其他主要仿真参数如表3所示<sup>[15]</sup>。所有仿真结果均为1000次蒙特卡洛实验结果的平均值。

将本文算法分别与文献[8]、文献[10]及文献[16]中所提算法进行对比分析, 在文献[16]中, 作者首先将DUEs分成不同的组并且每组分配一个CUE进行信道资源的复用, 随后以系统内能够容纳的DUEs数目最多为优化目标提出了一种功率控制机制。在无特殊说明情形下, 参数 $M=30, N=40, P_{\max}^d = 20$  dBm,  $\gamma_{\text{th}} = 30$  dB, DUEs间通信距离为50 m。图2给出了系统平均吞吐量的累积分布函数曲线。从图2中可以得到本文算法的性能要明显优

表 3 仿真参数

参数	数值
CUEs数量	30, 40
DUEs数量	25~60
DUEs间通信距离	30~100 (m)
CUEs通信路径损耗	$128.1+37.6\lg(d(\text{km}))$
DUEs通信路径损耗	$148+40\lg(d(\text{km}))$
噪声谱密度	-114 dBm/Hz
DUEs最小吞吐量限制	1.5 Mbps
CUEs传输功率	24 dBm

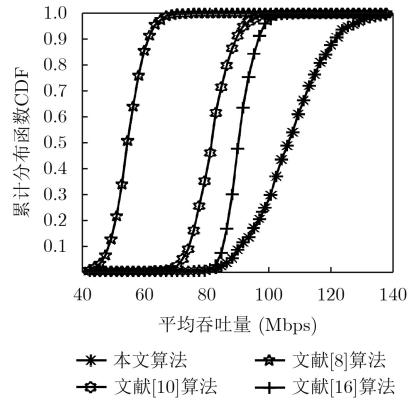


图 2 系统平均吞吐量的累积分布函数

于其余3种算法, 本文算法的最大吞吐量分别比文献[8]、文献[10]及文献[16]中所提算法的最大吞吐量提升了94%, 44%以及31%。这是由于与CUE只能与单一DUE复用信道资源相比, 本文算法能够更加有效的利用信道资源, 并且可以为DUEs分配最佳的传输功率。

图3给出了DUEs最大传输功率限制 $P_{\max}^d$ 对系统平均吞吐量影响的示意图。从图3中能够得到系统平均吞吐量随着 $P_{\max}^d$ 的增加而不断提升, 当 $P_{\max}^d = 20$  dBm时, 本文算法的平均吞吐量分别比文献[8]、文献[10]以及文献[16]提升了87%, 24%和16%。当DUEs传输功率较小时, 平均吞吐量增加的速度较为明显, 最终逐渐趋于平缓, 这是由于随着 $P_{\max}^d$ 的不断增大, DUEs对CUEs的干扰达到了临界点, 此时系统的平均吞吐量不再随着 $P_{\max}^d$ 的增加而继续递增。与此同时, 当曲线变得平滑时本文算法的平均吞吐量随着 $\gamma_{\text{th}}$ 的递增而不断递减, 这是由于随着 $\gamma_{\text{th}}$ 的增加, CUEs对通信系统内引入DUEs所带来的干扰的影响变得愈发敏感, 对系统内D2D通信的限制也变得愈发严格, 从而使得系统吞吐量的曲线随着 $\gamma_{\text{th}}$ 的增加而呈现出下降的趋势。

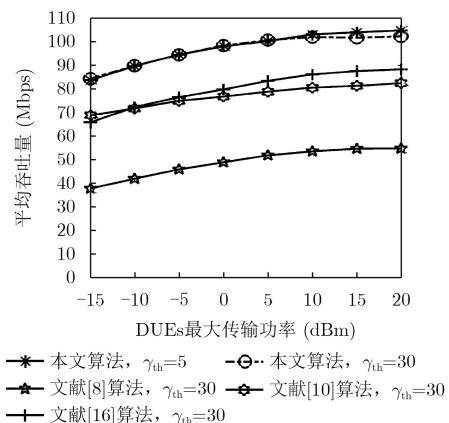


图 3 DUEs最大传输功率对系统平均吞吐量的影响

图4给出了DUEs间通信距离对系统平均吞吐量影响的示意图。从图4中可以得出系统的平均吞吐量随着DUEs间通信距离的增加而不断地递减,这是由于随着DUEs间通信距离的不断递增,DUEs间的信号衰减不断增大而造成的,并且本文算法的性能要优于其他两种方法。

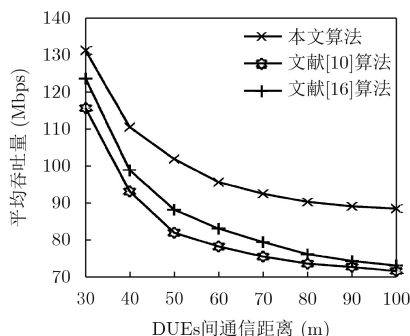


图4 DUEs间通信距离对平均吞吐量的影响

图5给出了系统内DUEs数量对DUEs接入概率影响的示意图。从图5中可以得出DUEs接入概率随着DUEs用户数的增加而逐渐递减,这说明对于某一特定数量的CUEs,通信系统内能够容纳的DUEs的数量是有限的,随着系统内DUEs数量的增加,通信系统逐渐趋于饱和。同时可以得到DUEs接入概率随着 $\gamma_{th}$ 的增加而不断降低,这是因为随着 $\gamma_{th}$ 不断递增,通信系统对待接入网络的DUEs的限制变得更加严格,使其接入通信系统变得更加困难,这一点与图3中系统平均吞吐量随着 $\gamma_{th}$ 增加反而呈现出递减趋势的原因是相同的。

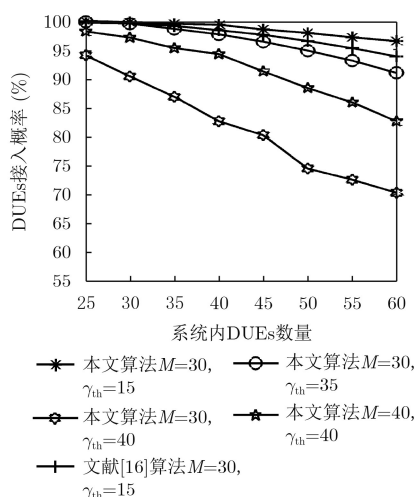


图5 系统内DUEs数量对DUEs接入概率的影响

## 5 结束语

本文针对单个CUE能够与多对DUEs共享信道资源的通信场景,提出一种D2D信道选择与功率控

制策略,在为系统内DUEs分配合适信道资源的同时又求解出了DUEs最佳传输功率,保证了系统吞吐量的最大化。仿真结果表明,相比较于传统CUE只能与单对DUE共享信道资源的限制条件,本文算法能够大幅度提升系统吞吐量以及DUEs接入概率,在相同实验环境下该算法的性能也要明显由于现有算法。本文方案能够为未来D2D通信发展提供合理性的指导意见,下一阶段工作将主要集中于密集小区覆盖场景下D2D通信资源分配策略的研究。

## 参考文献

- [1] BENNIS M, DEBBAH M, and POOR H V. Ultrareliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(10): 1834–1853. doi: 10.1109/JPROC.2018.2867029.
- [2] 钱志鸿, 阎双叶, 田春生, 等. LTE-A网络中D2D通信的资源分配算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(10): 2287–2293. doi: 10.11999/JEIT180043.
- [3] QIAN Zhihong, YAN Shuangye, TIAN Chunsheng, *et al.* Research on resource allocation algorithm for D2D communications underlying LTE-A networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2287–2293. doi: 10.11999/JEIT180043.
- [4] 王练, 王萌, 任治豪, 等. D2D网络中基于立即解网络编码的时延最小化重传方案[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(7): 1691–1698. doi: 10.11999/JEIT170976.
- [5] WANG Lian, WANG Meng, REN Zhihao, *et al.* Delay minimization retransmission scheme based on instantly decodable network coding for D2D communications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(7): 1691–1698. doi: 10.11999/JEIT170976.
- [6] 钱志鸿, 王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述[J]. *通信学报*, 2016, 37(7): 1–14. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016129.
- [7] QIAN Zhihong and WANG Xue. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 1–14. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016129.
- [8] XIANG Shangwen, PENG Tao, LIU Ziyang, *et al.* A distance-dependent mode selection algorithm in heterogeneous D2D and IMT-advanced network[C]. *Proceedings of 2012 IEEE Globecom Workshops, Anaheim, USA, 2012*: 416–420. doi: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477608.
- [9] WEN Si, ZHU Xiaoyue, LIN Zhesheng, *et al.* Distributed resource management for device-to-device (D2D) communication underlay cellular networks[C]. *The 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, London, UK, 2013*: 1624–1628. doi: 10.1109/PIMRC.2013.6666402.

- [7] LEE D H, CHOI K W, JEON W S, *et al.* Two-stage semi-distributed resource management for device-to-device communication in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(4): 1908–1920. doi: [10.1109/TWC.2014.022014.130480](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.022014.130480).
- [8] ZHANG Wei, HE Wanbing, WU Dan, *et al.* Joint mode selection, link allocation and power control in underlying D2D communication[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2016, 10(11): 5209–5228. doi: [10.3837/tiis.2016.11.001](https://doi.org/10.3837/tiis.2016.11.001).
- [9] WANG Xianxian, LÜ Shaobo, WANG Xing, *et al.* Greedy heuristic resource allocation algorithm for device-to-device aided cellular systems with system level simulations[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2018, 12(4): 1415–1435. doi: [10.3837/tiis.2018.04.002](https://doi.org/10.3837/tiis.2018.04.002).
- [10] AHMAD M, NAEEM M, IQBAL M, *et al.* Joint user selection, mode assignment, and power allocation in cognitive radio-assisted D2D networks[J]. *IET Communications*, 2018, 12(10): 1207–1214. doi: [10.1049/iet-com.2017.1206](https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.1206).
- [11] XU Jun, GUO Chengcheng, and ZHANG Hao. Joint channel allocation and power control based on PSO for cellular networks with D2D communications[J]. *Computer Networks*, 2018, 133: 104–119. doi: [10.1016/j.comnet.2018.01.017](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.017).
- [12] GJENDEMSJO A, GESBERT D, OIEN G E, *et al.* Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization[C]. The 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, Boston, USA, 2006: 1–6. doi: [10.1109/WIOPT.2006.1666517](https://doi.org/10.1109/WIOPT.2006.1666517).
- [13] ESMAT H H, ELMESALAWY M M, and IBRAHIM I I. Joint channel selection and optimal power allocation for multi-cell D2D communications underlying cellular networks[J]. *IET Communications*, 2017, 11(5): 746–755. doi: [10.1049/iet-com.2016.0955](https://doi.org/10.1049/iet-com.2016.0955).
- [14] UL HASSAN N, YUEN C, SAEED S, *et al.* Power control for sum-rate maximization on interference channels under sum power constraint[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(2): 593–609. doi: [10.1109/TVT.2014.2324289](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2324289).
- [15] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-advanced[R]. Report ITU-R M.2135, 2009.
- [16] DINH-VAN S, SHIN Y, and SHIN O S. Resource allocation and power control based on user grouping for underlay device-to-device communications in cellular networks[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2017, 28(1): e2920. doi: [10.1002/ett.2920](https://doi.org/10.1002/ett.2920).
- 钱志鸿: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为无线网络通信技术, 包括蓝牙、RFID、M2M、D2D、无线传感器网络及物联网等。
- 田春生: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为D2D通信技术与物联网。
- 王鑫: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为D2D通信技术。
- 王雪: 女, 1984年生, 副教授, 研究方向为D2D通信技术与物联网。