

## D2D 通信的干扰控制和资源分配算法研究

范康康, 董颖, 钱志鸿, 王雪

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 针对 D2D (device-to-device) 通信复用蜂窝资源所带来的干扰问题, 提出了一种单小区蜂窝系统下 D2D 通信的干扰控制和资源分配算法。首先, 根据系统内用户之间的干扰构建干扰图, 为 D2D 用户寻找可以复用的信道资源; 然后根据预先设定的 D2D 用户优先级依次为 D2D 用户执行信道资源预分配和信道交换策略。仿真结果表明, 所提出的算法可以明显提高系统的吞吐量以及 D2D 用户的接入率, 使系统在存有少量或大量 D2D 用户的情况下都能使性能达到更优。

**关键词:** D2D 通信; 干扰控制; 资源分配; 信道交换

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018240

## Research on the interference control and resource allocation in D2D communication

FAN Kangkang, DONG Ying, Qian Zhihong, WANG Xue

College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

**Abstract:** In order to solve the problem of interference caused by D2D users reuse cellular resources in cellular network, an algorithm of interference control and resource allocation of D2D communication in single cell cellular system was proposed. Firstly, an interference graph was constructed according to the interference between users in the system to find the reusable channel resource for D2D users. Then, the channel resource pre-allocation and the channel switching policy were performed for D2D users in sequence according to the preset D2D user priority. The simulation results show that the proposed algorithm can significantly improve the system throughput and the access rate of D2D users so that the system can achieve better performance in the presence of small or large number of D2D users.

**Key words:** D2D communication, interference control, resource allocation, channel exchange

### 1 引言

近年来, 智能终端数量增长迅速, 而蜂窝系统中的频谱资源却是有限的, 为了能够满足更多用户的需求, D2D 通信技术应运而生。D2D 通信技术作为短距离无线通信的关键技术可以明显降低基站负载, 并且已经加入到 LTE-Advanced 相关的技术标准中<sup>[1]</sup>。D2D 通信不需要基站作为中继, 能够大

幅度的提高蜂窝系统的频谱利用率以及吞吐量, 可以使更多的设备接入到系统中<sup>[2]</sup>。目前, D2D 通信技术已经成为物联网<sup>[3]</sup>与下一代移动通信 (5G, 5-generation) <sup>[4-5]</sup>的关键技术之一。

D2D 通信主要存在 3 个研究热点: 模式选择<sup>[6-8]</sup>、功率控制<sup>[9-10]</sup>和资源分配。而在研究中干扰是不可避免的, 合理的干扰管理可以有效提高系统的整体性能。本文针对资源分配展开研究, 现有的资源分

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-05-09

通信作者: 钱志鸿, dr.qzh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771219); 吉林大学基础科研基金资助项目 (No.SXGJQY2017-9, No.2017TD-19)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61771219), Fundamental Research Funds of Jilin University (No.SXGJQY2017-9, No.2017TD-19)

配算法大多都集中在蜂窝用户和 D2D 用户一对一的分配方式。Xu<sup>[11]</sup>提出了一种启发式算法,在 D2D 对和蜂窝用户独立分配信道时,优先保证蜂窝通信,在每一轮分配中 D2D 对优先选择对蜂窝用户干扰最小的资源复用。Feng<sup>[12]</sup>提出了一种完美信道下的资源分配算法,运用分支定界法将问题分成了 3 个步骤,根据距离为 D2D 链路定义接入方式、依据凸优化算法选择最佳功率以及通过二分图来进行分配资源。Guo 等<sup>[13]</sup>提出了一种在瑞利衰落信道下多用户场景的基于图的资源分配方案,有效地降低了计算复杂度。Wang<sup>[14]</sup>则提出一种简化的二分图,以最大化速率为目标运用匈牙利算法进行资源分配。

对于一对一的分配方式仅适用于 D2D 用户数量小于蜂窝用户数量的情况。而当蜂窝系统中存在大量 D2D 用户时,上述的资源分配方式将不再适用,于是就出现了多对一的分配方式,即多对 D2D 用户复用一個蜂窝用户的信道资源。对此, Xu 等<sup>[15]</sup>同时研究了信道分配和功率控制问题,允许多对 D2D 与蜂窝用户共享资源,以最大限度地提高 D2D 通信链路的能量效率。Yang 等<sup>[16]</sup>提出了一种全资源共享方案,每个信道可以由蜂窝链路和任意数量的 D2D 链路共享,可以很大程度上提高用户的吞吐量。Sun<sup>[17]</sup>根据系统中各个通信链路之间的相互干扰,提出了一种贪婪启发式算法,可以显著增加 D2D 链路的接入数量。上述文献中的多对一的资源分配算法,虽然可以明显提高蜂窝系统的吞吐量,但是其分配方式仍然存在较大的干扰,不能同时保证蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量(QoS, quality of service)需求,并且仅适用于 D2D 用户较多的情况。与上述文献不同, Son 等<sup>[18]</sup>提出了一种分组的资源分配方式,将 D2D 用户分成几组,尽量保证空间上远离的 D2D 用户分成一组,最终在蜂窝用户的候选集中选择距离基站最近的蜂窝用户,此算法保证了用户的 QoS 需求,并且在接入率上有很大的提高,但是算法的优化过程中没有考虑吞吐量,因此系统总的吞吐量保持在一个较低的水平,同时一旦 D2D 用户增多,每一个组内的 D2D 用户也必然增多,此时无法保证组内 D2D 用户之间的距离在合理的范围之内。

为了更好地解决上述问题,本文提出了一种 D2D 通信的干扰控制和资源分配算法,首先根据系统内存在的干扰建立一个干扰图,然后为将要接入蜂窝系统的 D2D 用户分配优先级,最后为 D2D 用户执行资源预分配方案,并执行信道交换策略以提

高系统吞吐量。本文算法可以使蜂窝系统中存在少量 D2D 用户或大量 D2D 用户的情况下都能使性能达到更优,不仅可以明显提高系统总的吞吐量和 D2D 用户的接入率,还可以减小系统内的干扰,有效保证蜂窝用户和 D2D 用户的 QoS 需求。

## 2 系统模型

在单小区蜂窝网络中,假设存在  $M$  个蜂窝用户和  $N$  对 D2D 用户,同时有  $M$  个信道资源,每一个蜂窝用户占用不同的信道资源,这样就构成了一个全负载蜂窝系统。根据  $M$  和  $N$  的数量关系可以分为两种情况:当蜂窝系统中存在较少的 D2D 用户时,即  $M \geq N$ ,往往采用一对一的分配原则;当蜂窝系统中存在大量的 D2D 用户时,即  $M < N$ ,若采用一对一的方式进行分配,将会有大量的 D2D 用户无法接入网络,因此在这种情况下应采用多对一的方式来提高系统吞吐量以及 D2D 用户的接入率。本文算法同时适应于  $M \geq N$  和  $M < N$  的情况。在全负载网络中,蜂窝用户和 D2D 用户的索引集表示为  $C = \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $D = \{1, 2, \dots, N\}$ ,信道索引集表示为  $\{Ch_1, Ch_2, \dots, Ch_M\}$ 。如图 1 所示,若有 3 对 D2D 用户  $\{D_1, D_2, D_3\}$  和 2 个蜂窝用户  $\{C_1, C_2\}$ ,  $D_i-S$  表示 D2D 用户的发射端,  $D_i-R$  表示 D2D 用户的接收端。  $D_1$  和  $D_2$  复用  $C_1$  的信道资源,  $D_3$  单独复用  $C_2$  的信道资源,则网络中存在 3 种干扰,即同一信道内 D2D 用户之间的干扰, D2D 用户对基站的干扰以及蜂窝用户对 D2D 用户的干扰。

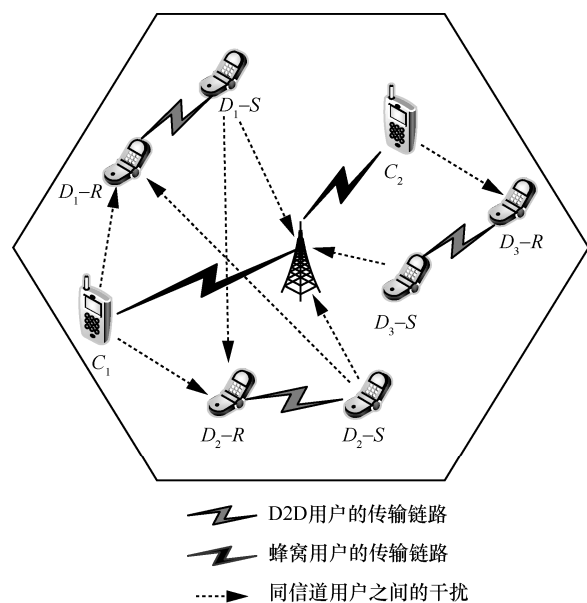


图 1 系统模型

在蜂窝系统中, 本文考虑了由多径衰落带来的快衰落  $\gamma$  和由阴影衰落带来的慢衰落  $\mu$ , 同时, 定义蜂窝用户到基站的链路信道增益为  $G_{CB} = \lambda\gamma_{CB}\mu_{CB}d_{CB}^{-\chi}$ , 其中,  $\lambda$  和  $\chi$  分别表示路径损耗常数和路径损耗指数,  $d_{CB}$  为蜂窝用户到基站的距离。同理, 可以求得 D2D 用户的链路信道增益为  $G_{SR} = \lambda\gamma_{SR}\mu_{SR}d_{SR}^{-\chi}$ , D2D 用户的发射端到基站的干扰增益为  $H_{SB} = \lambda\gamma_{SB}\mu_{SB}d_{SB}^{-\chi}$ , 蜂窝用户到 D2D 用户接收端的干扰增益为  $H_{CR} = \lambda\gamma_{CR}\mu_{CR}d_{CR}^{-\chi}$ , 以及同一信道内 D2D 用户之间的干扰增益为  $H_{S,R_j} = \lambda\gamma_{S,R_j}\mu_{S,R_j}d_{S,R_j}^{-\chi}$ 。而由于不同信道中的 D2D 用户使用的是正交资源, 因而彼此之间不存在干扰。

蜂窝用户和 D2D 用户的信干噪比(SINR)及其限制条件表示如下。

$$SINR_j^C = \frac{P_j^C G_{CB}}{\sum_{i=1}^{o_i} P_i^D H_{S_i,B} + N_0} \quad (1)$$

$$SINR_j^C \geq SINR_{\min}^C \quad (2)$$

$$SINR_i^D = \frac{P_i^D G_{SR}}{P_j^C H_{CR_i} + \sum_{v=1, v \neq i}^{o_i} P_v^D H_{S_v,R_i} + N_0} \quad (3)$$

$$SINR_i^D \geq SINR_{\min}^D \quad (4)$$

$$P_{\min}^C \leq P_j^C \leq P_{\max}^C \quad (5)$$

$$P_{\min}^D \leq P_i^D, P_v^D \leq P_{\max}^D \quad (6)$$

其中,  $P_j^C$  表示第  $j$  个蜂窝用户的发射功率,  $P_i^D$  表示第  $i$  对 D2D 用户的发射功率,  $P_{\max}^C$ 、 $P_{\max}^D$ 、 $P_{\min}^C$ 、 $P_{\min}^D$  分别表示蜂窝用户和 D2D 用户的最大、最小发射功率,  $o_i$  表示同一信道 D2D 用户的数量,  $SINR_{\min}^C$ 、 $SINR_{\min}^D$  分别表示蜂窝用户和 D2D 用户的最小信干噪比。

系统中总体的吞吐量可表示为式(7)。

$$T_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N R_i^D + \sum_{j=1}^M R_j^C \quad (7)$$

$$R_j^C = B \log(1 + SINR_j^C) \quad (8)$$

$$R_i^D = B \log(1 + SINR_i^D) \quad (9)$$

其中,  $R_j^C$ 、 $R_i^D$  分别表示蜂窝用户和 D2D 用户的速率,  $B$  表示信道带宽。为了最大化系统吞吐量  $\max\{T_{\text{sum}}\}$ , 需要有一个合理的分配方式, 同时提高 D2D 用户的接入率。

### 3 基于干扰图的干扰管理

#### 3.1 干扰图的构建

为了在 D2D 用户分配好信道之后不影响信道内其他用户的正常通信, 因此构建了一个干扰图来减少系统内的干扰。如图 2 所示, 以 3 对 D2D 用户  $D_1, D_2, D_3$  和 3 个信道  $Ch_1, Ch_2, Ch_3$  为例, D2D 用户按照预先分配的优先级依次进行信道分配, 将 D2D 用户和信道构建干扰图。干扰图表示为  $G=(V,E)$ , 顶点  $V$  表示 D2D 用户和信道资源, 边  $E$  表示为 D2D 用户和信道之间的连线, 权值为彼此之间的干扰值, 并且每一对 D2D 用户都包含一个优先级属性, 用  $\delta(D_i)$  表示。各对 D2D 用户都具有不同的优先级, 按照优先级依次为 D2D 用户分配信道。假设图中 D2D 用户的优先级大小为  $\delta(D_1) > \delta(D_2) > \delta(D_3)$ , 则先为  $D_1$  寻找信道资源, 当  $D_1$  加入到  $Ch_1$  时, 更新  $Ch_1$  内的用户, 然后为  $D_2$  寻找信道, 更新其所找到的满足复用条件的信道内用户, 如此循环, 直到遍历完所有的 D2D 用户。D2D 用户和信道之间的权值用 (干扰向量)  $S_{ij}$  来表示, 即  $S_{ij} = \{I_{D_i,D_j}, I_{C_j,D_i}, I_{D_i,C_j}\}$ 。其中,  $I_{D_i,D_j}$  为 D2D 对之间的干扰,  $I_{C_j,D_i}$  为蜂窝用户对 D2D 用户的干扰,  $I_{D_i,C_j}$  为 D2D 用户对蜂窝用户的干扰。若信道中只有蜂窝用户时, 则  $I_{D_i,D_j} = 0$ ; 若一个信道中包含多对 D2D 用户, 不需要计算出  $I_{D_i,D_j}$  的具体结果, 只要任意两对 D2D 用户之间的距离大于 3.2 节中定义最小安全距离,  $I_{D_i,D_j}$  将保证在合理范围之内。当 D2D 用户同时满足这 3 个干扰限制条件时, D2D 用户与信道之间才有连线, 即表示此 D2D 用户可以复用此信道资源, 由此可以得到 D2D 用户的候选集, 例如由图 2 可以得到 D2D 用户  $D_1$  的候选集为  $\{Ch_1, Ch_2\}$ 。

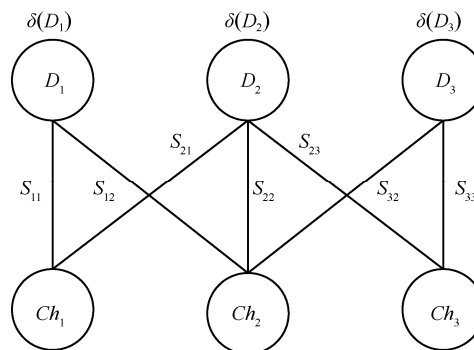


图 2 干扰图

### 3.2 D2D 用户之间的干扰

为了保证信道分配后每对 D2D 用户的通信质量, 本文限制同一信道中 D2D 用户之间的距离大于一定的安全距离, 以使 D2D 用户受到的干扰在合理范围之内。通过理论分析可以得到每一对 D2D 用户可以与其他 D2D 用户共享同一信道的最小距离  $d_{0i}$ , 只有 D2D 用户之间的距离不小于  $d_{0i}$  才能保证 D2D 用户之间的干扰在合理范围之内。由式(3)可以得到式(10)和式(11)。

$$SINR_i^D \geq \frac{P_i^D G_{SR}}{P_j^C H_{CR_i} + I_{D_i, D_j} + N_0} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I_{D_i, D_j} &= \sum_{z=1}^{o_i} P_z^D \lambda \gamma_{S_z, R_i} \mu_{S_z, R_i} d_{0i}^{-\alpha} + \\ &\quad \sum_{y=1, y \neq i}^{Re} P_y^D \lambda \gamma_{S_y, R_i} \mu_{S_y, R_i} d_{0i}^{-\alpha} \\ &= J_{D_i, D_j} d_{0i}^{-\alpha} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中将 D2D 用户分为两部分, 第一部分为信道内现有的 D2D 用户  $o_i$  对, 第二部分为还未分配信道的 D2D 用户  $Re$  对。令

$$\frac{P_i^D G_{SR}}{P_j^C H_{CR_i} + I_{D_i, D_j} + N_0} = SINR_{\min}^D \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以求得 D2D 用户对之间的最小距离。

$$d_{0i} = \left( \frac{SINR_{\min}^D J_{D_i, D_j}}{P_i^D G_{SR} - SINR_{\min}^D (P_j^C H_{CR_i} + N_0)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

因为在不同信道中已有的 D2D 用户是不同的, 所以  $d_{0i}$  会根据信道的不同而不同。D2D 用户之间的距离定义为一个矩阵  $\mathbf{d}_{ij}$ , 矩阵对角线是同一对 D2D 用户的距离, 所以设置为零。

$$\mathbf{d}_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

本文定义一个指示集合  $\Psi_{ij}$ , 当  $d_{ij} \geq d_{0i}$  且  $d_{ji} \geq d_{0j}$ ,  $\Psi_{ij} = 1$ , 否则  $\Psi_{ij} = 0$ 。当  $\Psi_{ij} = 1$  时, 表示第  $i$  对 D2D 用户和第  $j$  对 D2D 用户可以分配到同一个信道中。

$$\Psi_{ij} = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & \cdots & \Psi_{1N} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & \cdots & \Psi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_{N1} & \Psi_{N2} & \cdots & \Psi_{NN} \end{pmatrix} \quad (15)$$

为了方便说明, 以几何图形的方式来分析上述过程, 以 D2D 用户  $D_i$  的发射端为圆心,  $d_{0i}$  为半径画圆, 其圆外称为可行性区域, 允许可行性区域内的其他 D2D 用户与  $D_i$  分在同一个信道。以 3 对 D2D 用户  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  为例, 如图 3 所示,  $D_1$  的接收端在  $D_2$  的可行性区域, 并且  $D_2$  的接收端也在  $D_1$  的可行性区域, 即  $d_{12} \geq d_{01}$ ,  $d_{21} \geq d_{02}$ , 所以  $D_1$  和  $D_2$  可以分配在同一个信道中。由于  $D_3$  的接收端不在  $D_2$  的可行性区域, 即  $d_{23} < d_{02}$ , 所以  $D_3$  不能与  $D_2$  分配在同一个信道中。

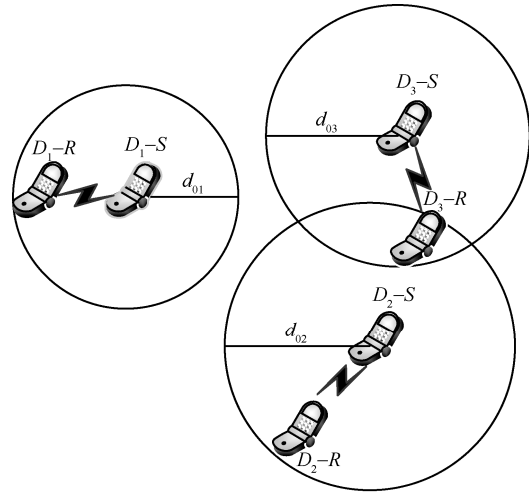


图 3 D2D 用户之间的干扰距离限制

### 3.3 蜂窝用户对 D2D 用户的干扰

为了更好地保证 D2D 用户的 QoS, 还要考虑蜂窝用户对 D2D 用户的干扰。同样, 本文提出的算法也要满足信道内 D2D 用户与被复用的蜂窝用户大于一定的安全距离, 这样 D2D 用户才可以接入到某一信道中。首先, 将  $H_{CR_i}$  带入式(3)可得式(16)。

$$SINR_i^D = \frac{P_i^D G_{SR}}{P_j^C \lambda \gamma_{CR_i} \mu_{CR_i} d_{CR_i}^{-\alpha} + \sum_{v=1, v \neq i}^{o_i} P_v^D H_{S_v, R_i} + N_0} \quad (16)$$

由式(16)、式(4)可以得到蜂窝用户和 D2D 用户的最小距离。

$$SINR_i^D \geq \frac{P_i^D G_{SR}}{P_j^C \lambda \gamma_{CR_i} \mu_{CR_i} d_{CR_i}^{-\alpha} + I_{D_i, D_j} + N_0} \quad (17)$$

$$I_{D_i, D_j} = \sum_{z=1}^{o_i} P_z^D H_{S_z, R_i} + \sum_{y=1, y \neq i}^{Re} P_y^D H_{S_y, R_i} \quad (18)$$

$$d_{CR_i} = \left( \frac{SINR_{\min}^D P_j^C \lambda \gamma_{CR_i} \mu_{CR_i}}{P_i^D G_{SR} - SINR_{\min}^D (I_{D_i, D_j} + N_0)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (19)$$

与式(11)中类似, 将 D2D 用户分为两部分, 如式(18)所示, 第一部分为信道内现有的 D2D 用户  $o_i$  对, 第二部分为还未分配信道的 D2D 用户  $Re$  对。由式(19)可知,  $d_{CR_i}$  会根据信道的不同而不同。当加入某一信道时, D2D 用户和蜂窝用户的距离  $D_{CR_i} > d_{CR_i}$ , 此 D2D 用户就有机会复用此信道资源。

### 3.4 D2D 用户对蜂窝用户的干扰

分布在同一信道的 D2D 用户, 不仅要保证 D2D 用户所受的干扰在合理范围之内, 更重要的是要保证蜂窝用户所受的干扰不能影响其通信质量。由式(1)~式(4)可以得到蜂窝用户所能承受的最大干扰, 如式(20)所示。

$$I_j^C = \frac{P_j^C G_{CB}}{SINR_{MIN}^C} - N_0 \quad (20)$$

当 D2D 用户使用某一信道资源之后, 若信道内所有 D2D 用户对蜂窝用户的干扰满足  $I^C \leq I_j^C$ , 此 D2D 用户可以考虑复用该信道资源。

综上所述,  $I_{D_i D_j}$ 、 $I_{C_j D_i}$  可以保证 D2D 用户的 QoS,  $I_{D_i C_j}$  可以保证蜂窝用户的 QoS。在干扰图中, 只有同时满足上述 3 个条件时, D2D 用户和信道之间才有连线, 表示此 D2D 用户可以分配到此信道。

## 4 D2D 用户资源分配策略

本文首先定义 D2D 用户的优先级, 并按照优先级大小依次分配资源。D2D 用户的优先级由 QoS 需求、等待时延<sup>[19]</sup>和用户的紧急程度<sup>[20]</sup>共同决定。QoS 需求由 D2D 用户的业务类型决定, 3GPP 划分了 4 种业务, 分别为会话类业务、流类业务、交互类业务和背景类业务, 并根据吞吐量和时延抖动等要求赋予了不同的权值, 且满足  $W_{se} > W_{st} > W_{in} > W_{ba}$ ; 同时随着 D2D 用户的等待时间  $T_{wait}$  的增加, 其优先级也不断增加, 当  $T_{wait} \geq T_{max}$  时, 优先级设置为最高值  $\delta_{max}$ ,  $T_{max}$  为 D2D 用户可以容忍等待的最大时间; 紧急程度由 D2D 用户在一定时间  $T$  内的请求次数决定, 请求次数越多说明紧急程度越大, 当请求次数大于一定次数  $N_{max}$  之后, 优先级设置为最高值  $\delta_{max}$ 。基站实时监测用户的状态信息, 并为 D2D 用户分配优先级, D2D 用户  $x$  的优先级  $\delta(D_x)$  定义如下。

$$\delta(D_x) = \left( \frac{W_x \left( e^{\frac{N}{N_{max}} - 1} \right) \left( e^{\frac{T_{wait} - 1}{T_{max}}} \right)}{\sum_{x=1}^{x=N} W_x \left( e^{\frac{N}{N_{max}} - 1} \right) \left( e^{\frac{T_{wait} - 1}{T_{max}}} \right)} \right) \quad (21)$$

$$\delta(D_x) = \delta_{max}, N \geq N_{max} \quad (22)$$

$$\delta(D_x) = \delta_{max}, T_{wait} \geq T_{max} \quad (23)$$

其中,  $W_x$  表示 D2D 用户的 QoS 需求,  $e^{\frac{N}{N_{max}} - 1}$  表示紧急程度所带来的权重,  $e^{\frac{T_{wait} - 1}{T_{max}}}$  表示 D2D 用户在系统内的等待时间所带来的权重。本文定义 4 个矩阵  $T_{ij}^D$ 、 $T_{ij}^C$ 、 $T_{ij}$ 、 $\rho_{ij}$ ,  $T_{ij}^D$ 、 $T_{ij}^C$  分别表示第  $i$  对 D2D 用户复用第  $j$  个信道资源时 D2D 用户与信道内蜂窝用户的吞吐量;  $T_{ij}$  表示吞吐量  $T_{ij}^D$  与  $T_{ij}^C$  之和;  $\rho_{ij}$  是复用指示集, 初始值为零矩阵, 若第  $i$  对 D2D 用户复用第  $j$  个信道资源, 则设置  $\rho_{ij} = 1$ ; 第  $j$  个信道的总吞吐量表示为  $T_{jsum}$ 。

$$T_{ij}^D = \begin{pmatrix} T_{11}^D & \cdots & T_{1M}^D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1}^D & \cdots & T_{NM}^D \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$T_{ij}^C = \begin{pmatrix} T_{11}^C & \cdots & T_{1M}^C \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1}^C & \cdots & T_{NM}^C \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\rho_{ij} = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1} & \cdots & \rho_{NM} \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$T_{ij} = T_{ij}^D + T_{ij}^C \quad (27)$$

$$T_{jsum} = \sum_{i=1}^N \rho_{ij} R_i^D + R_j^C \quad (28)$$

由式(3)和式(4)可以得到 D2D 用户所能承受的最大干扰。

$$I^D = \frac{P_i^D G_{SR}}{SINR_{min}^D} - N_0 \quad (29)$$

### 4.1 D2D 用户资源预分配

为了最大化系统的总吞吐量, 首先进行资源预分配。按照优先级顺序依次为 D2D 用户进行资源分配, 假设  $\delta(D_s) > \delta(D_l) > \cdots > \delta(D_o) > \delta(D_p) > \cdots$ , 过程如下。

**步骤 1** 计算 D2D 用户的候选集  $\{S^*\}$ 。按照优先级顺序在为第  $k$  对 D2D 用户分配资源时, 根据干扰图判断第  $k$  对 D2D 用户复用不同信道资源时是否同时满足  $I_{D_k C_j} \leq I_k^C$ 、 $I_{C_j D_k} \leq I^D$ , 若满足, 将这些信道加入此 D2D 用户的候选集  $\{S_k^*\}$ 。

**步骤 2** 计算  $T_{kj}$ ,  $j$  表示 D2D 用户候选集  $\{S_k^*\}$  中的信道资源, D2D 用户预先选择吞吐量最大的信

道。被选择的信道将不再被其他 D2D 用户复用,但仍可以加入后续 D2D 用户的候选集。若  $\{S_k^*\}$  中的信道已经被其他 D2D 用户占用,则执行步骤 3,否则返回步骤 1。

**步骤 3** 优化策略组合。若某一 D2D 用户  $m$  的候选集  $\{S_m^*\}$  中的所有信道已经被其他 D2D 用户占用,则取出  $T_{mj}$  最大的信道所复用的 D2D 用户  $n$ ,判断  $\{S_n^*\}$  中是否存在未被占用的信道资源。若有,则令第  $n$  对 D2D 用户在  $\{S_n^*\}$  未被占用的信道资源中选择  $T_{nj}$  最大的信道复用,第  $m$  对 D2D 用户复用 D2D 用户  $n$  空出的信道资源,否则,取出  $T_{mj}$  次大的信道继续执行。若存在 D2D 用户一直找不到可以复用的信道,即  $\{S_n^*\} = \phi$ ,  $\phi$  表示空集,此 D2D 用户进入等待状态,并继续为下一对 D2D 用户分配资源。直到每一个信道都被某一对 D2D 用户复用或已经遍历完所有的 D2D 用户为止,将剩余 D2D 用户存入集合  $F$  中,并按优先级排序。若  $F = \phi$ ,算法结束,否则执行步骤 4。

**步骤 4** 计算系统中剩余 D2D 用户的候选集  $\{S_i^*\}$ 。若信道中已经存在 D2D 用户,则计算此 D2D 用户最小安全距离  $d_{0i}$ ,构造信道的可行性区域。取集合  $F$  中的第一对 D2D 用户  $D_i$ ,根据干扰图判断  $S_{ij}$  中的变量是否满足。首先计算第  $i$  对 D2D 用户最小安全距离  $d_{0i}$ ,根据  $d_{0i}$  判断此 D2D 用户在哪些信道的可行性区域,得到初始候选集  $\{S_{i1}\}$ ;其次计算最小安全距离  $d_{CR_i}$ ,判断  $D_{CR_i} > d_{CR_i}$  是否成立,若成立将信道加入此 D2D 用户得到初始候选集  $\{S_{i2}\}$ ,取  $\{S_{i1}\}$  和  $\{S_{i2}\}$  的交集得到第  $i$  对 D2D 用户的中期候选集  $\{MS_i\}$ ;最后将第  $i$  对 D2D 用户加入  $\{MS_i\}$  中的信道时,判断  $I^C \leq I_j^C$  是否成立,得到第  $i$  对 D2D 用户的最终候选集  $\{S_i^*\}$ 。

**步骤 5** 选取最优策略。第  $i$  对 D2D 用户在最终候选集  $\{S_i^*\}$  中预先选择吞吐量增益  $\Delta\theta_i$  最大的信道复用,当此 D2D 用户加入某一信道之后,更新该信道的可行性区域。接下来判断集合  $F$  中下一优先级的 D2D 用户,返回步骤 4。

**步骤 6** 遍历完所有的 D2D 用户算法终止。若存在 D2D 用户找不到合适的信道加入,即  $\{S_i^*\} = \phi$ ,则这些 D2D 用户进入等待状态。

吞吐量增益由式(30)表示。

$$\Delta\theta_{ii} = \sum_{j=1}^{o_j+1} T_j' - \sum_{j=1}^{o_j} T_j \quad (30)$$

式(30)中前半部分表示 D2D 用户加入  $j$  信道之后信道内用户总的吞吐量,后半部分表示 D2D 用户未加入  $j$  信道时信道内用户总的吞吐量。 $T_j'$ 、 $T_j$  表示信道内每个用户的吞吐量。

本文构建一个资源分配二分图  $g=(v,\varepsilon)$ ,来说明每对 D2D 用户在进行资源分配时可以复用的信道资源,若 D2D 用户的候选集中包含某一信道,则此 D2D 用户与信道之间就有连线,连线的权重为吞吐量大小。顶点  $v$  表示进行资源分配的 D2D 用户和信道资源,边  $\varepsilon$  表示 D2D 用户和信道之间的权值。如图 4 所示,顶点  $Ch_1, Ch_2, \dots, Ch_M$  表示信道,分布在图的上边,顶点  $D_1, D_2, \dots, D_N$  表示 D2D 用户,分布在图的下边。D2D 用户和信道之间的权值用  $T_{ij}$  表示。

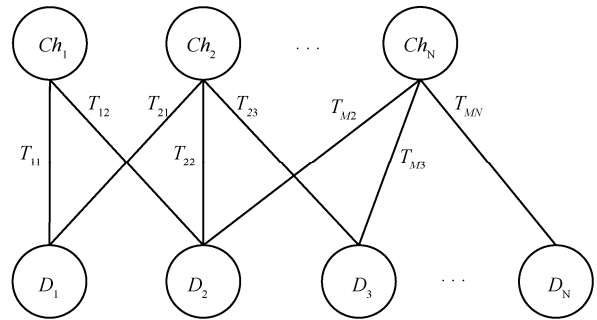


图 4 资源分配二分图

### 4.2 信道交换策略

为了使系统吞吐量进一步提高,本文在 D2D 用户预分配信道之后,执行信道交换策略,确定每对 D2D 用户最终分配的信道。信道交换策略指的是将不在同一信道的 D2D 用户  $i$  与 D2D 用户  $j$  交换复用信道。交换信道的首要条件是两对 D2D 用户的最终候选集  $\{S_i^*\}$  和  $\{S_j^*\}$  中要互相包含对方所在的信道才能有交换的资格。决定两对 D2D 用户是否交换信道的标准为吞吐量标准和中断概率标准。其中,吞吐量标准是指交换信道后是否能够提高系统吞吐量;中断概率标准是指信道的交换策略是否会导致信道内蜂窝用户通信中断或者发生交换的 D2D 用户通信中断,即判断是否满足其最小信干噪比要求,如式(2)、式(4)所示。当  $M \geq N$  时,仅对吞吐量标准进行判断,若吞吐量提高则交换信道;当  $M < N$  时,则同时对吞吐量标准和中断概率标准进行判断,若在吞吐量提高的同时信道内的用户不会发生通信中断则交换信道。本文依据上述准则将已经预分配信道的 D2D

用户按照优先级顺序依次与其他非同一信道的 D2D 用户执行信道交换策略，直到遍历完所有预分配信道的 D2D 用户为止。因此，信道交换的次数最多为  $N(N-1)$  次，由于 D2D 用户候选集的不同，并且存在两个用户在同一信道的情况等，其交换次数必然远远小于  $N(N-1)$ 。

### 4.3 复杂度分析

本文所提出的干扰控制和资源分配算法在系统性能方面有了很大的提高，但是衡量算法的优劣不仅仅在于系统性能，算法复杂度同样也是衡量算法优劣的重要指标。接下来本文分析在最差情况下的算法复杂度，最差情况为所有的 D2D 用户同时接入网络并且共用一个信道资源，其复杂度表示如式(31)所示。

$$\chi_{prop} = O((N)(N-1) + (N)^2(N-1)) \quad (31)$$

式(31)的前一部分为干扰控制部分的复杂度，后一部分为资源分配部分的复杂度。当  $N$  的值足够大时，取复杂度为  $\chi_{prop} = O((N)^3)$ 。

若在资源分配的过程中遍历所有的可能性，即最优算法。则其算法复杂度如式(32)所示。

$$\chi_{opt} = O(M^N) \quad (32)$$

从式(32)中可以看出，随着  $M$  和  $N$  数量的增加算法复杂度成幂指数增加。而本文所提出算法的复杂度都是在最差情况下求得的，真实情况中不会出现这种情况，所以算法复杂度会远远小于  $O((N)^3)$ 。因此，本文提出算法的复杂度要远远低于最优算法。

## 5 仿真

本文以 Matlab 2016a 为仿真平台对算法进行仿真，采用蒙特卡洛方法重复执行 1 000 次，然后对结果取平均值，每一次算法执行过程中，蜂窝用户和 D2D 用户均随机分布在系统中，D2D 用户之间的距离随机产生，并限定在 50 m 以内，分别在  $M \geq N$  和  $M < N$  两种情况下对系统性能进行仿真，同时仿真中蜂窝用户和 D2D 用户均取最大发射功率。系统中仿真参数如表 1 所示。

本文分别从吞吐量和 D2D 用户的接入率两方面与分组算法<sup>[18]</sup>、启发式算法<sup>[19]</sup>和随机算法进行比较。其中，为了将启发式算法与本文算法形成对比，本文对启发式算法在多对一的情况下进行了仿真；随机算法，即随机选择匹配组合。D2D 用户的接入率表示为成功接入网络的 D2D 用户数量与系统中所有 D2D 用户数量的比值。

表 1 仿真参数

参数	取值
小区半径/m	1 000
高斯白噪声( $N_0$ )/dBm	-114
路径损耗常数( $\lambda$ )	0.01
路径损耗指数( $\gamma$ )	4
蜂窝用户的最大发射功率/dBm	48
D2D 用户的最大发射功率/dBm	24
系统带宽/kHz	180
用户最低信干噪比/dB	6
多径衰落	单位均值的指数分布
阴影衰落	均值为 0，标准差为 8 的正态分布
D2D 用户之间的最大距离/m	50
用户到基站的最小距离/m	25

首先对  $M \geq N$  时系统吞吐量和 D2D 用户的接入率进行仿真，图 5 和图 6 中取  $M$  的数量为 30 个， $N$  的数量从 5 对增加到 30 对。如图 5 所示，本文提出的算法的吞吐量明显高于其他 3 种算法，在 D2D 用户数量较少时，本文提出算法与启发式算法、分组算法吞吐量相差较小，但随着 D2D 用户的增多，3 种算法的差距越来越大，吞吐量与启发式算法相比最大可提高约 13%。如图 6 所示，随着 D2D 用户数量的增加，本文算法与分组算法可以依然保持较高的接入率，仅出现轻微下降，而启发式算法的 D2D 用户接入率明显下降。由于随机算法选择复用信道资源的随机性，所以其 D2D 用户的接入率不会有明显的变化，基本保持在一个相对平稳的状态。

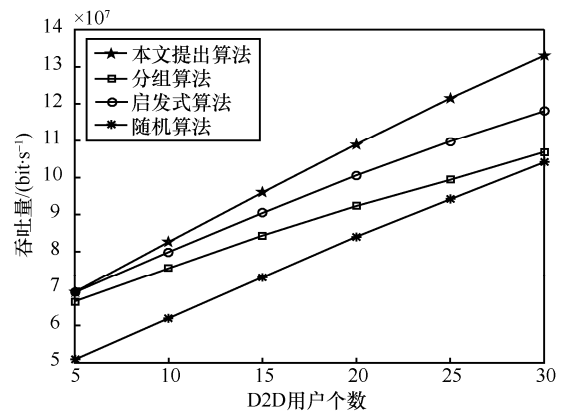


图 5  $M \geq N$  时系统吞吐量

从图 7 和图 8 可以得到当  $M < N$  时系统总的吞吐量和 D2D 用户的接入率的变化趋势。当系统中  $M$  的数量为 5 个， $N$  的数量从 5 对增加到 30 对时，如图 7 所示，随着 D2D 用户的增多吞吐量增加的速度逐渐变缓，这是由于系统资源有限，D2D 用户数目越多，

每个信道中含有的 D2D 用户也随之增多, 导致系统中干扰增大, 因而吞吐量增加趋势开始变缓。同时, 本文所提算法的吞吐量明显高于分组算法、启发式算法和随机算法。从图 8 可以看出, 随着 D2D 用户的增多其接入率逐渐下降, 同样是由于 D2D 用户越多干扰越大造成的。而且, 本文所提出的算法的用户接入率下降的幅度明显小于启发式算法和随机算法, 其用户接入率平均比启发式算法高约 30%, 比随机算法高约 38%。而分组算法在 D2D 用户较少的情况下可以保证较高的接入率, 但是当 D2D 用户的不断增大时, 与本文算法相比下降的幅度依然较大。

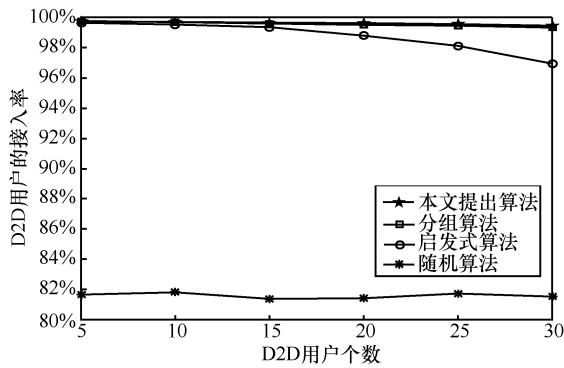


图 6  $M \geq N$  时 D2D 用户的接入率

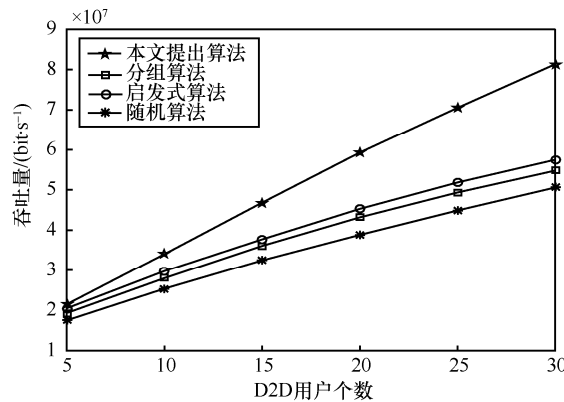


图 7  $M < N$  时系统吞吐量

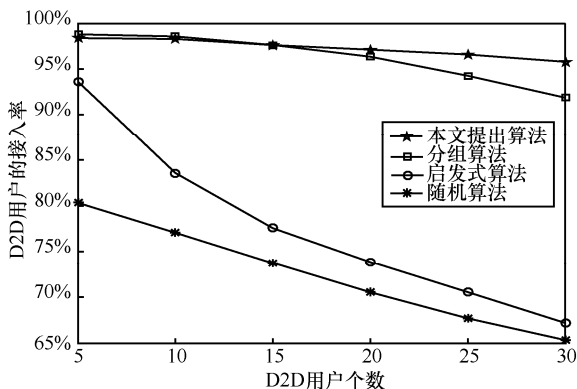


图 8  $M < N$  时 D2D 用户的接入率

接下来仿真  $M \geq N$  和  $M < N$  时每个信道吞吐量的累积分布函数图, 由于分组算法容易出现 D2D 用户集中复用少量蜂窝用户的情况, 导致组间 D2D 用户分布不均, 并且此算法并不是以提高吞吐量为主要目标, 仿真每个信道吞吐量的意义并不大, 因此此处只与启发式算法和随机算法作比较。从图 9 和图 10 中可以明显地看出本文所提出的算法明显优于其他算法。图 9 为  $M \geq N$  时的仿真图, 为了更清晰的观察算法性能, 取  $M$  和  $N$  的数量均为 30, 从图中可以看出本文提出的算法在吞吐量为  $4.0 \times 10^6 \sim 6.0 \times 10^6$  bit/s 的信道要明显高于其他两种算法, 约有 62% 的信道吞吐量超过  $4.0 \times 10^6$  bit/s, 而启发式算法和随机算法分别约占 41%、32%; 图 10 为  $M < N$  时的仿真图, 取  $M$  的数量为 5,  $N$  的数量为 30, 从图 10 中可以看出此时本文提出算法的系统吞吐量始终远远超过随机算法和启发式算法, 约有 88% 的信道吞吐量超过  $1.0 \times 10^7$  bit/s, 而启发式算法和随机算法分别约占 53%、45%。

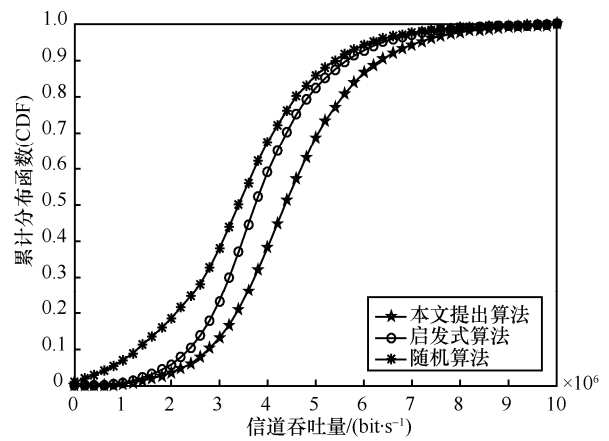


图 9  $M \geq N$  时信道吞吐量的累积分布函数

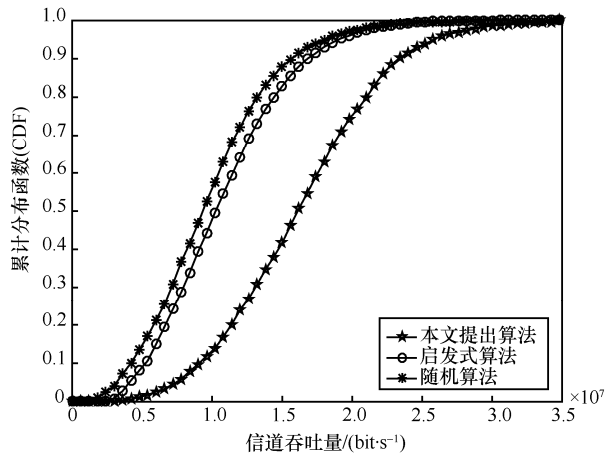


图 10  $M < N$  时信道吞吐量的累积分布函数

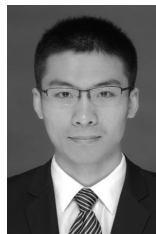
## 6 结束语

为了提高系统吞吐量和 D2D 用户接入率,降低用户之间的干扰,本文提出了一种 D2D 通信的干扰控制和资源分配算法。该算法分为干扰控制和资源分配两部分,在干扰控制方面建立一个干扰图,分析了系统中存在的 3 种干扰,并以此判断 D2D 用户可以复用的信道资源;在资源分配方面首先为 D2D 用户设定优先级,然后为 D2D 用户执行资源预分配,并执行信道交换策略以提高系统吞吐量。仿真结果显示,本文所提出的算法在吞吐量和 D2D 用户接入率方面都明显优于其他算法。

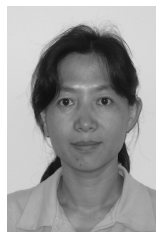
### 参考文献:

- [1] KLAUS D, MIKA R, CARL W, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49.
- [2] 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.  
QIAN Z H, WANG X. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 1-14.
- [3] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.  
QIAN Z H, WANG Y J. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215-227.
- [4] IMRAN A, ZOHA A. Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [5] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.  
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [6] CHOU H J, CHANG R Y. Joint mode selection and interference management in Device-to-Device communications underlaid MIMO cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 1120-1134.
- [7] HOANG T, LONG B L, LE-NGOC T. Joint mode selection and resource allocation for relay-based D2D communications[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(2): 398-401.
- [8] XU Y L. A distributed mode selection scheme for Device-to-Device communications[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 90(2): 639-655.
- [9] SOBHI-GIVI S, KHAZALI A, KALBKHANI H. Resource allocation and power control for underlay device-to-device communication in fractional frequency reuse cellular networks[J]. Telecommunication Systems, 2017, 65(4): 677-697.
- [10] WANG R, LIU J, ZHANG G, et al. Energy efficient power allocation for relay-aided D2D communications in 5G networks[J]. China Communications, 2017, 14(6): 54-64.
- [11] XU Y F, YIN R, HAN T, et al. Dynamic resource allocation for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2014, 27(10): 2408-2425.
- [12] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [13] GUO B, SUN S, GAO Q. Graph-based resource allocation for D2D communications underlying cellular networks in multiuser scenario[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2014, 2014(2): 1-6.
- [14] WANG L, TANG H, WU H Q, et al. Resource allocation for D2D communications underlay in rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1159-1169.
- [15] XU H, XU W, YANG Z H, et al. Energy-efficient resource allocation in D2D underlaid cellular uplinks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 560-563.
- [16] YANG Y, LIU T, MA X, et al. FRESH: push the limit of D2D communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(6): 1630-1643.
- [17] SUN H G, SHENG M, WANG X J, et al. Resource allocation for maximizing the Device-to-Device communications underlying LTE-advanced networks[C]. //2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China-Workshops (CIC/ICCC), 2013: 60-64.
- [18] VAN S D, SHIN Y, 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): 1-12.
- [19] BALAKRISHNAN R, CANBERK B. Traffic-aware QoS provisioning and admission control in OFDMA hybrid small cells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 802-810.
- [20] KALEEM Z, CHANG K. Public safety priority-based user association for load balancing and interference reduction in PS-LTE systems[J]. IEEE Access, 2016, 4: 9775-9785.

### [作者简介]



范康康 (1992-), 男, 山东滨州人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为 D2D 通信技术。



董颖 (1971-), 女, 辽宁开原人, 博士, 吉林大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为近距离无线通信技术、物联网、无线传感器网络。

钱志鸿 (1957-), 男, 吉林长春人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于物联网、D2D、WiFi、RFID 等无线网络与通信技术。

王雪 (1984-), 女, 吉林白山人, 博士, 吉林大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为物联网与 D2D 通信技术。