

LTE-A网络中D2D通信的资源分配算法研究

钱志鸿^{*①} 阎双叶^① 田春生^① 王鑫^{①②}

^①(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

^②(吉林农业大学信息技术学院 长春 130018)

摘要: 该文研究了D2D通信使用LTE-A网络上行链路的资源分配问题。首先将问题建模为混合整数非线性规划问题(MINLP),其次根据待接入用户对各信道的青睐程度计算特征值列表并形成相应联盟。在保证各用户服务质量(QoS)的情况下,利用最大加权二部图匹配(MWBM)方法为待接入网络用户寻找合适的资源及复用的组合。仿真结果表明,该算法打破了D2D用户在数据传输过程中一直处于专用或者复用模式的束缚,扩大了D2D用户对可选用的资源范围,与现有算法相比,可有效提高系统的总速率。

关键词: 无线通信; D2D通信; 资源分配; 最大加权二部图匹配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2287-07

DOI: 10.11999/JEIT180043

Research on Resource Allocation Algorithm for D2D Communications Underlying LTE-A Networks

QIAN Zhihong^① YAN Shuangye^① TIAN Chunsheng^① WANG Xin^{①②}

^①(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

^②(College of Information & Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130018, China)

Abstract: Uplink resource allocation problem in Device-to-Device (D2D) communications underlying LTE-A networks is analyzed. First, the problem is modeled as a Mixed Integer NonLinear Programming (MINLP). Then the algorithm calculates each waiting user's identity list in accordance with the preference for channels to form coalitions. On the premise of guaranteeing the Quality of Service (QoS) of users in the system, the suitable resource and reuse partner are assigned to each user through Maximum Weighted Bipartite Matching (MWBM). The simulation results show that this algorithm can break the constraint that D2D pairs can only stay on dedicated or reused mode when they are on data transmission, and expand the range of available resource for D2D users, which increases effectively the system sum-rate compared with the existing algorithm.

Key words: Wireless communications; D2D communications; Resource allocation; Maximum Weighted Bipartite Matching (MWBM)

1 引言

随着物联网众连接时代的到来^[1]及通信网络终端用户数量的快速增加,未来通信数据将爆炸性增长,可实现大规模终端接入的技术日益受到人们的关注。其中,应用在授权频段的D2D(Device-to-Device)通信技术更是引起了学术界的广泛的兴趣。它是一

种在蜂窝网络中复用传统蜂窝用户(Cellular Users, CUs)资源、允许邻近设备之间直接交换信息的技术^[2]。尽管D2D通信的引入会给现有的通信网络带来很大的干扰,但仍然可以通过合适的资源分配方式和其他干扰管理方式,降低通信系统核心网络的数据压力,大大提升频谱利用率和吞吐量,扩大网络容量,保证通信网络能更为灵活、智能、高效地运行^[3]。

现阶段,对于D2D资源分配问题的研究已取得了许多有意义的成果。Zhang等人^[4]将博弈论引入到D2D资源分配问题中来,提出了一种分布式算法,利用merge-and-split法则帮助用户合理地复用资源;Nguyen等人^[5]提出的资源分配方法,采用了

收稿日期: 2018-01-11; 改回日期: 2018-06-01; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 钱志鸿 dr.qzh@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)

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

一种竞价策略来控制D2D发射端的干扰,进而利用分布式的迭代规则达到纳什均衡;Kang等人^[6]认为用户位置也决定着用户之间是否可以进行资源复用,基于此提出了一种基于位置信息的D2D资源分配方式;Min等人^[7]则明确地提出了干扰限制区域(Interference Limited Area, ILA)的概念,进一步限定了可共享资源的用户之间距离上的要求;Zulhasnine等人^[8]利用信道增益的信息提出一种基于贪婪思想的启发式算法,以此减少对主蜂窝网络的干扰;Azam等人^[9]还考虑了D2D用户功率分配问题,提出了一种最大化蜂窝网络吞吐量和可接入用户数量的联合最优算法;而曲桦等人^[10]还考虑到设备有限的待机能力,提出一种联合功率控制、信道分配和中继选择的资源分配方案,可有效优化能量效率;Hoang等人^[11]则提出一种联合模式选择和资源分配的方法来管理D2D用户可能带来的干扰。然而,上述的系统模型都有着一些限制和不足,现阶段大多数D2D资源分配算法均是在无用户通信或者全负载小区^[12]中进行的,同时限制接入网络的D2D用户只能使用已经分配给CUs的信道进行数据传输^[13]。这一点不仅限制了D2D用户可选择资源的范围,同时也限制了D2D用户可以达到的最佳通信质量。为此本文在上述研究基础上提出了一种优先考虑用户服务质量(Quality of Service, QoS)的资源分配算法,将问题建模成为一个混合整数非线性规划(Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP)问题,并通过计算用户的特征值列表帮助用户形成联盟,进而利用图论在每个联盟中寻找最佳的复用组合以最大化系统的总速率。本文的主要贡献有:将小区中的用户细化成为4种类型,应用场景更具有实际意义且可以使D2D用户更充分地选择可用资源。同时本文算法打破了D2D用户在通信时只能保持在复用或者专用模式的束缚,即当网络中有新的CUs想要接入到网络时,将会有部分D2D用户在保证自身通信质量的前提下从专用模式切换成复用模式与新用户共享资源。最后用仿真证明了所提算法可显著提高系统的总速率。

2 系统模型及问题描述

2.1 系统模型

本文考虑的系统模型如图1所示。一个独立的蜂窝小区,基站(Base Station, BS)处于小区中心。若D2D用户选择了复用模式,则将与选择出来的CU共享蜂窝系统的上行链路资源。后文中将用集合 C 表示CUs,用集合 D 表示D2D用户。为了更贴合实际情况,本文根据用户的具体状态将两种用户进行细化,进一步分为稳定通信用户和待接入网

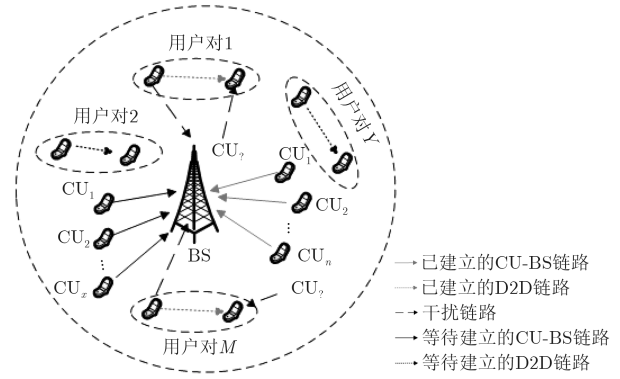


图1 系统模型

络用户。如图中,存在 N 个稳定通信的CU,用集合 C_n 表示; M 对稳定通信的D2D用户,用集合 D_m 表示;类似地,存在 X 个待接入网络的CU,用集合 C_x 表示; Y 对待接入网络用户的D2D用户,用集合 D_y 表示。在本文中,主要讨论如何为后两种用户进行资源分配。

本文假设该蜂窝小区中有 K 个相互正交的信道,并在下文中用集合 $CH = \{CH_1 CH_2 \cdots CH_K\}$ 表示。当 CH_k 被分配给CU i 和D2D用户对 j 时, CU i 的瞬时信号与干扰加噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)计算公式为

$$\zeta_{i,j}^k = \frac{P_i^c g_{i,B}^k}{P_j^d g_{j,B}^k + \sigma^2} \quad (1)$$

同理, D2D用户对 j 的接收端的瞬时SINR计算公式为

$$\zeta_{j,i}^k = \frac{P_j^d g_{j,j}^k}{P_i^c g_{i,j}^k + \sigma^2} \quad (2)$$

式中, σ^2 为噪声功率, P_i^c 和 P_j^d 分别表示CU i 和D2D用户对 j 的发射功率, $g_{i,B}^k$ 表示CU i 与BS之间的信道功率增益, $g_{j,B}^k$ 表示D2D用户对 j 的发射端到CU i 与BS之间链路的干扰信道功率增益, $g_{j,j}^k$ 表示D2D用户对 j 的发射端到接收端之间的信道功率增益, $g_{i,j}^k$ 表示CU i 到D2D用户对 j 的接收端之间的干扰信道功率增益。

2.2 问题描述

本文旨在最大化系统的通信链路总速率,所以问题可以归纳为数学表达式:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N+X} \sum_{j=1}^{M+Y} \left\{ \alpha_{i,k} B \log_2(1 + \zeta_{i,j}^k) + \beta_{j,k} B \log_2(1 + \zeta_{j,i}^k) \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \zeta_{i,j}^k \geq \zeta_{i,\min}^k, \forall i \in C \quad (4)$$

$$\zeta_{j,i}^k \geq \zeta_{j,\min}^k, \forall j \in D \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_{i,k} \leq 1, \sum_{k=1}^K \beta_{j,k} \leq 1, \forall i \in C, \forall j \in D \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N+X} \alpha_{i,k} \leq 1, \sum_{j=1}^{N+Y} \beta_{j,k} \leq 1, \forall i \in C, \forall j \in D \quad (7)$$

其中, B 代表信道的带宽, $\zeta_{i,j}^k$ 和 $\zeta_{j,i}^k$ 的表达式在式(1)和式(2)中给出; $\zeta_{i,\min}^k$ 和 $\zeta_{j,\min}^k$ 分别代表CU i 和D2D用户对 j 的最小SINR门限值。这里的 $\alpha_{i,k}$ 和 $\beta_{j,k}$ 是一对二值指示函数, 用来表示资源分配的结果, 它们的赋值为

$$\alpha_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{CH}_k \text{被分配给CU } i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{CH}_k \text{被分配给D2D用户对} j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

约束条件式(4)和式(5)描述的是最小SINR要求, 主要用来保证复用情况下用户所受到的干扰在一定范围内, 保证相应用户的QoS; 约束条件式(6)则保证在每次资源分配过程中, 每个CU和D2D用户对最多只能分配到一个信道; 而约束条件式(7)保证的是一个信道最多分配给一个CU和一对D2D用户进行复用。上述约束条件的设置均是为了降低D2D用户对的接入为网络带来的复杂多变的干扰。

3 资源分配算法

由于优化问题式(3)~式(7)是一个MINLP问题, 很难在系统资源调度时间内得到最优解。下面, 将通过两个步骤来解决上述资源分配问题。

3.1 待接入网络用户的特征值列表

在这一小节中, 主要讨论待接入网络的用户 C_x 和 D_y 为获取信道所做的准备工作。为了叙述方便, 本节将待接入网络的用户统一称为用户 s 。首先, 用户 s 会对所讨论的小区中所有的信道进行一个评估, 评估的参数是信噪比(Signal to Noise Rate, SNR)。用 $\gamma_{s,k}$ 来代表使用信道 CH_k 的通信链路中接收端的SNR, 其计算公式为

$$\gamma_{s,k} = \begin{cases} \frac{P_s g_{s,B}^k}{\sigma^2}, & \eta_{s,k} = 1 \\ 0, & \eta_{s,k} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, P_s 是用户 s 的发射功率, $g_{s,B}^k$ 是用户 s 到BS之间的信道功率增益。这里定义一个新概念, 叫用户特征值, 用 $\eta_{s,k}$ 来表示。根据约束条件式(6)和式

(7), 可以初步判断用户 s 是否可以使用 CH_k 进行数据通信。如果可以使用, 则 $\eta_{s,k} = 1$, 否则 $\eta_{s,k} = 0$ 。不同情况下 $\eta_{s,k}$ 的具体赋值如表1所示。

表1 $\eta_{s,k}$ 在不同情况下的赋值

CH _k 当前的状态	s 的用户类型	
	CU	D2D用户
已经被CU和D2D用户复用	0	0
只被CU占用	0	1
只被D2D用户占用	1	0
未被占用	1	1

本文用 Q_s 表示用户 s 的特征值列表, 表示为 $Q_s = \{(\eta_{s,k_1}, k_1, \gamma_{s,k_1}), (\eta_{s,k_2}, k_2, \gamma_{s,k_2}), \dots, (\eta_{s,k_K}, k_K, \gamma_{s,k_K})\}$, 其中的元素按照 $\gamma_{s,k_1} \geq \gamma_{s,k_2} \geq \dots \geq \gamma_{s,k_K}$ 的规律排列, k 是信道的索引值。这里认为对于用户 s 而言, 其 Q_s 的第1个元素的信道索引值代表了用户 s 当前最感兴趣的信道。

3.2 待接入网络用户的资源分配算法

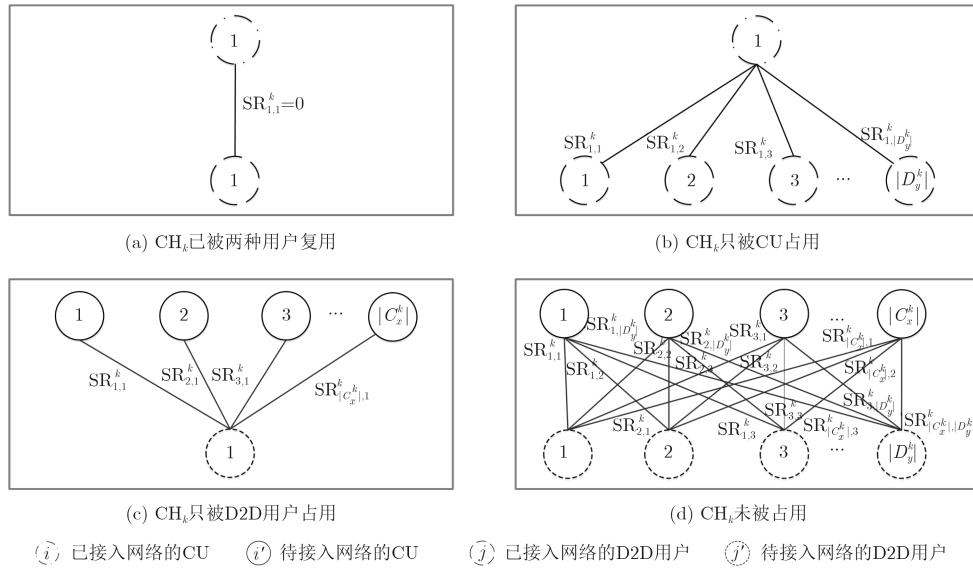
下面根据用户的特征值列表生成联盟。只有当前最感兴趣的信道是相同的用户才可以组成一个联盟。如果该信道的索引值是 k , 则将这个联盟表示为 I^k 。在这个联盟中, 可以提供最大速率增益的用户或者用户组合可以占用该信道进行数据传输。

首先定义联盟 I^k 的初始速率值。本文认为联盟中的初始速率值由相应 CH_k 上稳定通信的用户所提供, 因此, 联盟 I^k 的初始速率值可以表示为

$$\text{SR}_0^k = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,k} B \log_2 (1 + \zeta_{i,j}^k) + \sum_{j=1}^M \beta_{j,k} B \log_2 (1 + \zeta_{j,i}^k) \quad (11)$$

其中, $\forall i \in C_n, \forall j \in D_m$ 。接着定义联盟 I^k 的最终速率值。Liu^[14]已经证明了式(3)是一个最大加权二部图匹配(Maximum Weight Bipartite Matching, MWBM)问题。因此本文用一个加权二部图来代表 I^k , 其两个不相关的端点集合, 一个代表CUs, 一个代表D2D用户。由前文所述可知, 在待接入网络的用户形成联盟后, 蜂窝小区内将会存在4种情况的联盟, 如图2所示。

对于图2(a)中所示的情况, 信道 CH_k 在系统为待接入用户分配资源前就已经被两种用户复用了, 因此其最终的速率也全部由处于稳定通信的用户提供的, 计算公式如式(12):

图2 联盟 I^k 的4种可能形式

$$SR_{\text{sum}}^k = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,k} B \log_2 (1 + \zeta_{i,j}^k) + \sum_{j=1}^M \beta_{j,k} B \log_2 (1 + \zeta_{j,i}^k) \quad (12)$$

对于图2(b)中所示的情况, 联盟 I^k 的 CH_k 在系统为待接入用户分配资源前仅仅被稳定通信的CU占用, 还可以提供给一对待接入网络的D2D用户对进行数据通信, 因此联盟的最终速率可由稳定通信的CU及待接入网络的D2D用户对提供, 具体的计算公式为

$$SR_{\text{sum}}^k = B \log_2 (1 + \zeta_{i,j'}^k) + \sum_{j'=1}^Y \beta_{j',k} B \log_2 (1 + \zeta_{j',i}^k) \quad (13)$$

对于图2(c)中所示的情况, 联盟 I^k 的 CH_k 在系统为待接入网络用户分配资源前仅仅被稳定通信的D2D用户占用, 还可以将其分配给一个待接入网络的CU进行数据通信, 因此联盟的最终速率可由稳定通信的D2D对及待接入网络的CU提供, 具体的计算公式为

$$SR_{\text{sum}}^k = \sum_{i'=1}^X \alpha_{i',k} B \log_2 (1 + \zeta_{i',j}^k) + B \log_2 (1 + \zeta_{j,i'}^k) \quad (14)$$

这里值得注意的一点是, 在该种情况下, 如果有待接入网络的CU根据算法获得了 CH_k 进行数据传输, 那么与之复用的稳定通信的D2D用户对将由

于CU的接入从专用模式切换为复用模式。

而对于图2(d)中所示的情况, 联盟 I^k 的 CH_k 在系统为待接入用户分配资源前是未被任何用户占用的, 那么其最终速率均是由新接入网络的用户所提供, 其计算公式为

$$SR_{\text{sum}}^k = \sum_{i'=1}^X \alpha_{i',k} B \log_2 (1 + \zeta_{i',j'}^k) + \sum_{j'=1}^Y \beta_{j',k} B \log_2 (1 + \zeta_{j',i'}^k) \quad (15)$$

在式(12)~式(15)中有 $\forall i \in C_n, \forall j \in D_m, \forall i' \in C_x, \forall j' \in D_y$, 且上述公式中所有的SINR必须满足约束条件式(4)和式(5)。待接入网络用户的速率增益可以通过式(16)计算。

$$SR_{i'',j''}^k = SR_{\text{sum}}^k - SR_0^k \quad (16)$$

其中, $\forall i'' \in C, \forall j'' \in D$ 。定义 $SR_{i'',j''}^k$ 为加权二部图中对应CU i'' 与D2D用户对 j'' 之间连线的权重值。在联盟 I^k 中, 可以提供最大速率增益的用户或者用户组合可以获取相应的 CH_k 进行数据通信, 分别将它们记做CU i^* , D2D用户对 j^* 。而联盟中其他未获得 CH_k 的用户将删除掉特征值列表中的第1个元素, 以便加入到新的联盟中去寻找合适的信道进行数据传输。重复以上步骤, 直至所有用户都获得传输资源或者 $Q_s = \emptyset$ 。

4 仿真结果及分析

假设所讨论的蜂窝小区中 $K = 45$, 且CU和D2D用户位置均是随机分布的。同时假设D2D用户

对之间的距离不能超过50 m。阴影衰落符合对数正态分布，且蜂窝通信链路与D2D通信链路的标准差分别为8 dB和6 dB。其他的仿真参数如表2所示。

图3展示了本文算法与不同算法在无用户通信的蜂窝小区中和不同数量用户情况下的总速率的比较。为方便表述，后文中用 N_c 代表CU数量，用 N_d 代表D2D用户对的数量。图3中含有3种对比算法，分别为纯蜂窝模式，随机复用资源算法和贪婪启发式算法^[8]。其中，随机复用资源算法是在保证满足限制条件式(4)~式(7)的前提下，随机为D2D用户分配资源进行数据通信；而在贪婪启发式算法中，拥有良好信道质量的CU会选择对自己干扰最小的D2D用户进行资源的复用。从图中可以看到，应用了D2D通信方式的3种算法的总速率明显高于纯蜂窝模式，且本文算法和贪婪启发式算法都比随机算法有一个明显的提升。初始阶段，由于本文算法为待接入网络的用户优先安排评估值高的信道进行数据通信，尤其D2D用户可以充分选择可用资源，因此本文算法远远优于其他3种算法。随着用户数量增多，系统内资源逐渐紧张，因为贪婪启

发式算法在资源分配过程中考虑的是用户间相互干扰最小，所以当用户数量接近饱和时，其分配方案更优。

由于其他算法均不涉及D2D用户的模式切换或支持蜂窝小区新接入用户的情况，因此下面单独取出 $N_c = 40, N_d = 20$ 时的仿真数据进一步对比分析本文所提算法的性能。图4展示了本文算法与对比算法的累计分布函数图(Cumulative Distribution Function, CDF)。从图中可以看到，本文算法明显优于其他两种资源分配算法，当4种算法的CDF曲线趋近为1时，本文算法分别比贪婪启发式算法、随机复用资源算法和纯蜂窝模式的总速率提高了12%, 27%, 37%。

由于本文提出了一个新的应用场景模型和用户细分方式，因此下面对具有固定用户数目(此处选择 $N_c = 40, N_d = 20$)接入网络进行数据通信的情况，将用户数拆分成两批次接入网络的方式来模拟本文提出的稳定通信的CU、稳定通信的D2D用户、待接入网络的CU和待接入网络的D2D用户，并进一步检测所提算法的性质。图5展示了所讨论的蜂窝小区中分两批次接入用户后总速率的CDF。这里设两次小区均接入20个CU和10对D2D用户方便比对。图中初始速率曲线代表网络中第1次接入20个CU和10对D2D用户之后系统总速率的CDF曲线，当第2次接入用户时，第1次接入的用

表 2 仿真参数

参数	数值
小区半径	500 m
蜂窝链路的路径损耗	$128.1+37.6\lg(d[\text{km}])$
D2D链路的路径损耗	$140+40\lg(d[\text{km}])$
噪声谱密度	-114 dBm/Hz
BS的噪声指数	5 dB
用户的噪声指数	9 dB
BS的天线增益	14 dBi
设备的天线增益	0 dBi
BS的发射功率	46 dBm
蜂窝用户的发射功率	24 dBm
D2D用户的发射功率	20 dBm
两种用户的SINR门限值	0 dB

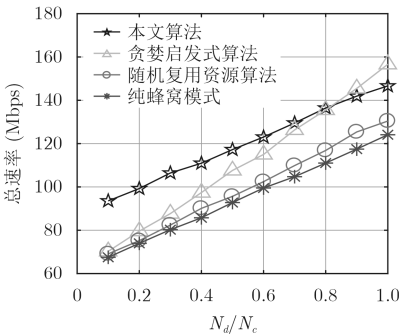


图 3 系统在不同数量用户情况下的总速率

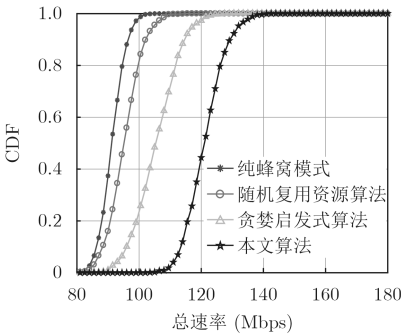


图 4 系统总速率的累积分布函数比较

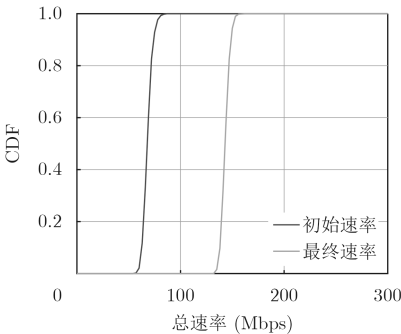


图 5 两次接入用户时系统总速率的累积分布函数

户已处于稳定通信模式,此时对应上文提出的稳定通信的CU和D2D用户提供的总速率,即所有联盟的初始速率 SR_0^k 的总和;图中最终速率曲线代表网络在已有20个CU和10对D2D用户前提下,第2次接入20个CU和D2D用户时的系统总速率的CDF曲线,新接入的第2批用户即对应本文提出的待接入网络的CU和D2D用户。从图中可以看出,本文算法可以在网络已有一定承载时,为新接入两种用户分配信道进行数据通信。且与图4中本文算法曲线相比,分两次接入用户比一次性接入全部40个CU和D2D用户,最大总速率有提升了约14%,这主要是由于待接入网络的CU选择的信道仅被稳定通信D2D用户占用,根据信道信息,两者复用该信道资源时可以保证两用户各自的QoS,此时处于专用模式的D2D用户将模式切换为复用模式,提高了系统的总速率。下面,通过图6进一步证明本文算法的运行过程中存在第1批已经稳定通信的D2D用户将自己的通信模式从专用模式切换为复用模式以保证新用户的顺利接入。

图6比较了在本文算法下,接入不同数量的CU和D2D用户对系统总速率的影响。显而易见,接入用户数量越多系统的总速率越大。这里可以明确体现D2D用户模式切换的是图中 $N_d=40$ 的曲线。在约束条件式(4)~式(7)的限制下,D2D用户数量已接近饱和,而为了使待接入网络的CU可以顺利通信,处于稳定通信的部分D2D用户对将会把通信模式从专用模式切换为复用模式,保证总速率曲线呈增长趋势。

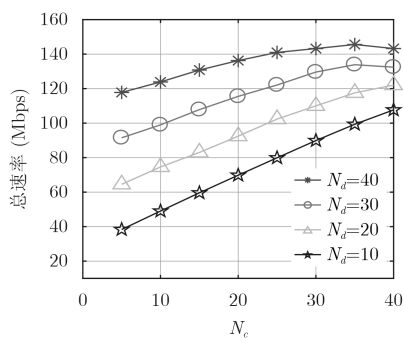


图6 D2D用户和CU数目对系统总速率的影响

5 结束语

本文研究了在蜂窝网络中D2D通信的资源分配问题,提出了一种旨在最大化蜂窝小区总速率的资源分配算法。首先让待接入网络的用户评估小区内可占用的信道,根据评估情况计算自己的特征值列表,进而形成联盟;在满足自身及复用用户的SINR

条件后,利用MWBM算法为待接入网络用户寻找合适的复用组合并分配合适的资源进行通信。最后在无用户通信的蜂窝小区内进行仿真,通过和同类算法进行对比,验证了当 $N_{\text{cell}}=40$, $N_{\text{dd}}=20$ 时,所提算法可以比贪婪启发式算法、随机复用资源算法和纯蜂窝模式的总速率提高12%,27%,37%;而后在本文提出的特定条件下对算法本身性能进行仿真测试,证明算法可以应用在本文所提的网络模型中,且可以实现D2D用户的模式切换过程,对比于无切换过程,系统总速率最大值可提高约14%。在未来的研究中,将进一步探索在异构网络中D2D用户资源分配的问题。

参考文献

- [1] 钱志鸿,王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023–1029. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.026.
QIAN Zhihong and WANG Yijun. IoT technology and application[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2012, 40(5): 1023–1029. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.026.
- [2] 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. doi: 10.1109/MCOM.2009.5350367.
- [3] 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.
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.
- [4] ZHANG R Q, SONG L Y, HAN Z, *et al.* Distributed resource allocation for device-to-device communications underlaying cellular networks[C]. IEEE 5th International Conference on Communications, Budapest, 2013: 1889–1893. doi: 10.1109/ICC.2013.6654797.
- [5] NGUYEN H H, HASEGAWA M, and HWANG W J. Distributed resource allocation for D2D communications underlay cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5): 942–945. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2498925.
- [6] KANG S H, SEO B W, and KIM J G. Location based group selection in resource allocation for D2D uplink cellular networks[J]. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(10): 279–288. doi: 10.14257/ijfgcn.2016.9.10.24.
- [7] MIN H, LEE J, PARK S, *et al.* Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlaying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(12): 3995–4000. doi:

- 10.1109/TWC.2011.100611.101684.
- [8] ZULHASNINE M, HUANG C, and SRINIVASAN A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]. IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Niagara Falls, 2010: 368–375. doi: 10.1109/WIMOB.2010.5645039.
- [9] AZAM M, AHMAD M, NAEEM M, *et al.* Joint admission control, mode selection, and power allocation in D2D communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7322–7333. doi: 10.1109/TVT.2015.2487220.
- [10] 曲桦, 朱正仓, 赵季红, 等. 移动中继协助下终端直通中面向能效的联合中继选择和资源分配方案[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2464–2471. doi: 10.11999/JEIT161359.
- QU Hua, ZHU Zhengcang, ZHAO Jihong, *et al.* Energy-efficient joint relay selection and resource allocation scheme for mobile relay aided device-to-device communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2464–2471. doi: 10.11999/JEIT161359.
- [11] HOANG T D, LONG B L, and LE-NGOC T. Joint mode selection and resource allocation for relay-based D2D communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(2): 398–401. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2617863.
- [12] FENG Daquan, LU Lu, YUAN-WU Y, *et al.* Device-to-Device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3541–3551. doi: 10.1109/TCOMM.2013.071013.120787.
- [13] YU Guanding, XU Lukai, FENG Daquan, *et al.* Joint mode selection and resource allocation for Device-to-Device communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(11): 3814–3824. doi: 10.1109/TCOMM.2014.2363092.
- [14] LIU Yuan. Optimal Mode selection in D2D-Enabled multibase station systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 470–473. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2514100.
- 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.
- 阎双叶: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为D2D通信技术.
- 田春生: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为物联网与D2D通信技术.
- 王 鑫: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为D2D通信技术.