



研究与开发

# 面向蜂窝—D2D 混合场景的双层博弈匹配算法

姚天, 张晖

(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 随着无线技术的迅猛发展, 无线接入网络进入新的阶段, 即第五代 (5G) 移动通信系统阶段。多种技术场景并存的 5G 环境具有异构性和动态性的特点, 对无线资源管理提出了严峻的挑战。如何实现网络资源与用户需求之间的最佳匹配变得尤为重要。因此, 5G 环境下无线资源匹配算法已成为当前研究热点。提出一种面向蜂窝—D2D 混合场景的双层博弈匹配算法, 建立基于用户体验质量的公平性匹配模型, 采用双层的匹配博弈理论加以求解, 通过仿真验证所提算法的有效性, 结果证明了所提算法的可行性。

**关键词:** 5G 环境; 蜂窝场景; D2D 场景; 资源匹配; 匹配博弈

**中图分类号:** TN915

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2018027

## A bilevel game matching algorithm in cellular-D2D hybrid scenario

YAO Tian, ZHANG Hui

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** With the rapid development of wireless technologies, wireless access networks enter the 5G system phase. 5G environment with various technical scenarios is heterogeneous and dynamic, causing great challenges for wireless resource management. Hence, it is significant to achieve the optimal matching between network resources and user demands. Therefore, wireless resource matching algorithms in 5G environment have become one of the hottest research directions. A bilevel game matching algorithm in cellular-D2D hybrid scenario was proposed: a QoE based matching model considering user fairness was constructed, the bilevel matching game theory was used to solve this optimization problem, and the effectiveness of proposed algorithm was verified through simulations.

**Key words:** 5G environment, cellular scenario, D2D scenario, resource matching, matching game

收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-11-17

通信作者: 张晖, zhhjoice@126.com

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No.61471203); 江苏省“六大人才高峰”项目 (No.RJFW-024); 江苏省“青蓝工程”项目 (No.2016); 南京邮电大学“1311”人才计划基金资助项目 (No.2015); 通信与网络技术国家工程研究中心开放课题 (No.TXKY17002); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题 (No.KJS1518); 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2012ZX03001008-003)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61471203), Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province (No.RJFW-024), “Qing Lan Project” of Jiangsu Province (No.2016), “1311 Talent Program” of NJUPT (No.2015), Open Project of National Engineering Research Center of Communications and Networking (No.TXKY17002), Open Project of Jiangsu Provincial Key Laboratory for Computer Information Processing Technology (No.KJS1518), National Science & Technology Major Project (No.2012ZX03001008-003)



## 1 引言

在过去的数十年里,移动通信已经彻底地改变了人们的生活方式,但人们对于更高性能的移动通信系统的追求却从未止步。为了适应未来 5G 系统连续广域覆盖、热点高容量、低功耗大连接和低时延高可靠的技术场景,在移动物联网和互联网发展的驱动下,移动通信系统进入新的发展阶段,即第五代(5G)移动通信系统阶段<sup>[1-4]</sup>。

在移动通信系统应对多样化的业务需求和不断提升的速率要求时,频谱资源、能耗和部署成本等成为移动通信系统发展的主要制约条件。与此同时,5G 移动通信系统具有动态性和异构性等特点,均对无线资源管理提出了严峻的挑战。因此,5G 环境下无线资源管理问题成为当前无线通信领域中的研究热点。

无线资源管理问题本质上是指无线资源和用户的业务需求之间的匹配问题。无线资源的匹配算法可以分为 3 个层次:第一层业务侧优化算法,即通过降低用户体验质量,自适应地优化业务传输的指标要求,实现业务需求与给定网络资源的匹配,例如,参考文献[5]中提出了一种在带宽有限的情况下,根据不同用户的最低需求来调节用户的速率,寻求系统总体效用最大化的速率分配方案;第二层网络侧优化算法,是指通过对网络资源的最优匹配实现某种网络性能目标(吞吐量,系统传输时延),从而保障用户的业务需求,目前这一类匹配是研究的重点,以参考文献[6]中给出的算法为例,将系统吞吐量作为优化指标,采用联盟博弈算法来解决多个 D2D 用户和蜂窝用户的上行资源分配问题;第三层网络和业务匹配算法,通过从网络侧与业务侧的联合优化,以最小的资源量和最优的分配方式来保障用户的业务体验质量,参考文献[7]给出了根据网络状态适时调整传输负载,然后在满足传输时延要求的情况下,通过优化资源调度方案使系统总体

效用最优化的算法。

本文研究的匹配算法属于第二层网络侧优化算法,对于 5G 环境下的信道分配问题,现有的研究主要采用凸优化算法<sup>[8]</sup>、贪心算法<sup>[9]</sup>和基于博弈论的算法<sup>[10-12]</sup>。其中基于博弈论的算法应用较为广泛,例如非合作博弈理论常被用于分布式地解决在 D2D 通信中的资源分配问题<sup>[13-15]</sup>,但从这个模型中得到纳什均衡是单边不稳定的。相比较而言,以匹配博弈理论为基础的资源分配提供了一种分布式自组织的双边稳定的匹配。匹配博弈论最初用于经济学领域,用以解决如婚姻匹配、大学录取等双边的匹配问题<sup>[16]</sup>。随着匹配博弈论的发展,越来越多的学者将其用于无线通信领域中,用以解决无线资源匹配问题<sup>[17]</sup>,突破了博弈论的很多局限性。

参考文献[18]提出了基于匹配博弈理论,为基站中蜂窝用户分配信道的算法。ZHOU Z Y 等人<sup>[19]</sup>提出了基于博弈理论的 D2D 通信环境下以系统能耗作为优化指标,采用迭代的方法对频谱和功率进行联合分配的算法。而在参考文献[20]中,提出了一种以系统的吞吐量为优化指标,基于多对多匹配博弈理论的 D2D 用户信道分配算法。这些算法均提供了易于实现的架构,以解决 NP 难无线资源分配问题。

但是,上述参考文献提出的算法中,没有考虑 5G 蜂窝—D2D 混合场景下同时为蜂窝用户和 D2D 用户分配信道的问题,同时它们大多都是以系统的吞吐量为优化指标,且没有考虑到用户的公平性问题。而 5G 环境下,作为关键技术之一的 D2D 通信技术在提高系统容量和频率利用率的同时,也为蜂窝用户引进了干扰,极大地提高了不同用户信道分配的复杂度。同时,5G 通信系统以用户体验为导向,一味追求系统的吞吐量已不再适用,因此本文提出了一种面向蜂窝—D2D 混合场景的双层博弈匹配算法,建立了基于体验质量(QoE)的公平性匹配模型。

## 2 网络场景

在 5G 蜂窝—D2D 用户混合场景中, 假设一个蜂窝内同时存在  $I$  个蜂窝用户 (CU) 和  $J$  个 D2D 用户对 (DU), 即  $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_I\}$ ,  $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_J\}$ 。其中 DU 中的发送端和接收端分别用  $\{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iJ}\}$  和  $\{d_{r1}, d_{r2}, \dots, d_{rJ}\}$  表示。同时, 蜂窝中有  $L$  个信道即  $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, L\}$ , 蜂窝用户 (CU) 在这些信道上通信。对于 CU  $c_i$  来说, 分配给它的所有信道可以看成是一个资源块  $\text{RB}_i$ , 与用户集合  $\mathcal{C}$  相对应, 资源块的集合表示为  $\text{RB} = \{\text{RB}_1, \text{RB}_2, \dots, \text{RB}_I\}$ 。DU 复用 CU 的资源块  $\text{RB}$  来传输消息。每个 DU 可以使用多个 CU 的资源块进行通信, 而每个 CU 的资源块也可以被多个 DU 接入。系统的模型如图 1 所示。

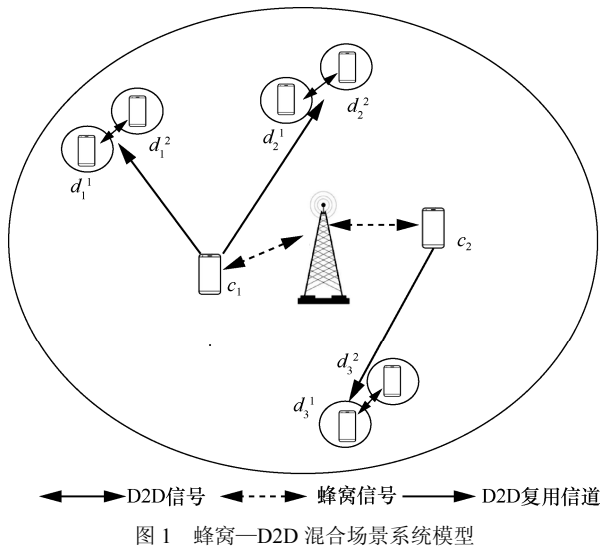


图 1 蜂窝—D2D 混合场景系统模型

当信道响应服从独立高斯分布时, 可以将信道包络看成是瑞利衰落的。因此, 信道增益可以表示为  $G = \beta d^{-\eta} |h|^2$ , 其中  $\beta$  是系统参数,  $\eta$  是路径衰落的指数, 而  $h$  是复高斯信道的参数, 其遵循  $h \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 。

## 3 模型构建

在系统中, 每个 CU  $c_i$  的传输功率是  $Q_i$ , 在信道  $l$  上传输时用  $\gamma_i$  来表示用户  $c_i$  处接收到的信噪

比  $\gamma_i = \frac{Q_i G_{B,i}}{\sum_j x_{i,j} p_j^i G_{B,j} + N_0}$ 。其中,  $G_{B,i}$  和  $G_{B,j}$  分别是

指从基站到  $c_i$  和  $d_j$  的增益,  $N_0$  是指接收端的高斯噪声。基于香农公式, 可以得到用户  $c_i$  在信道  $l$  的传输速率是  $r_i = B \log(1 + \gamma_i)$ 。而对于 DU 而言, 多个 DU 共享同一个资源块, 也允许同一个 DU 占用多个资源块, 用  $x_{ij}$  来表示一个资源块是否被分配给了一个 DU。具体来说, 如果一个资源块  $\text{RB}_i$  被分配给  $\text{DU} d_j$ , 那么  $x_{ij} = 1$ , 否则  $x_{ij} = 0$ 。规定每个 DU 的传输功率是固定的, 并且平均分配给其所占用的资源块, 即  $p_j^i = \frac{P_j}{\sum_{i=1}^I x_{ij}}$ , 而  $P_j$  是  $\text{DU} d_j$  发送端总的发

送功率。类似地, 当  $\text{DU} d_j$  在  $\text{RB}_i$  上传输时,  $d_{rj}$  接收到的 SINR 是  $\gamma_j^i = \frac{p_j^i G_{j,i}}{Q_i G_{i,i} + \sum_{j' \neq j} x_{i,j'} p_{j'}^i G_{j',i} + N_0}$ 。其

中,  $G_j$ 、 $G_{i,j}$  和  $G_{j,j}$  分别是  $\text{DU} d_j$  和  $d_{rj}$  间的信道增益、 $\text{RB}_i$  和  $\text{DU} d_{rj}$  之间的增益以及  $d_{rj}$  和  $d_j$  之间的增益。 $p_j^i$  是  $\text{DU} d_j$  的传输功率。因此, DU 在  $\text{RB}_i$  上传输时数据速率为  $r_j^i = B \log(1 + \gamma_j^i)$ 。

由于 5G 系统是以用户体验为导向的, 在该模型中采用 QoE 作为优化指标, 用满意度效用函数来描述具有不同的速率需求的用户的 QoE, 即定义如下:

$$u(r) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + e^{-\tau(r - r_{\text{req}})}} + \frac{1}{1 + e^{\tau[r + r_{\text{req}} - (r_d + r_s)]}} \right) \quad (1)$$

其中,  $r$  表示单个用户的吞吐量,  $r_{\text{req}}$  表示用户基本速率需求;  $r_s$  表示用户饱和速率需求,  $r_d$  表示使用户满意度下降所对应的速率初始值,  $\tau$  为斜率参数。对于每个用户来讲,  $r_{\text{req}}$ 、 $r_s$ 、 $r_d$  和  $\tau$  均可能不同。显然, QoE 指标由两部分组成: 第一部分表明 (以用户基本速率需求为基准) 当吞吐量越大, 用户需求越能得到满足, 相应的 QoE 越大; 第二部分表明随着吞吐量增大, 用户需求已经完全满足 (达到饱和), 以用户饱和速率需求为基准, 再行增加吞吐量, 已无法提升用户体验, 反



而会造成成本提高,故相应的 QoE 将会变小。可以看出,上述定义能够准确地描述吞吐量与 QoE 的关系。

那么,系统总体效用值用  $U(X)$  来表示,即系统内所有 CU 和 DU 的满意度效用之和。 $u_{c_i}(R_{c_i})$  和  $u_{d_i}(R_{d_i})$  由式 (1) 计算得出。因此,最优化模型构建如下:

$$\max U(X) = \sum_{i \in I} u_{c_i}(R_{c_i}) + \sum_{j \in J} u_{d_j}(R_{d_j}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. C1: } & x_{i,j} \gamma_j^i \geq x_{i,j} \gamma_j^{\min}, \forall i, j \\ \text{C2: } & \gamma_i \geq \gamma_i^{\min}, \forall i \\ \text{C3: } & x_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \{1, \dots, J\} \\ \text{C4: } & \sum_j x_{i,j} \leq q_{\max}, \forall i \\ \text{C5: } & u_s \geq u_{s_{\min}}, \forall s = c_i, d_j \end{aligned}$$

限制条件 C1 和 C2 限制 CU 和 DU 必须满足其 SINR 的要求, C3 表明  $x_{i,j}$  的值只能是 0 或者 1, C4 表明每个 CU 的信道最多能被  $q_{\max}$  个 DU 复用,这个条件可以限制每个 CU 的信道上的干扰,同时减少执行的复杂度, C5 限制条件是考虑到用户的公平性,保证每个 DU 和 CU 所获得的体验质量都能达到它们的最低限度,以防出现信道分配严重不均的情况。

## 4 双层博弈匹配算法求解

在 5G 环境下的蜂窝—D2D 混合场景中,存在两种干扰,即 DU 复用 CU 的资源块对 CU 造成的干扰和复用同一个 CU 资源块的 DU 之间产生的干扰,使 DU 和 CU 的匹配结果相互影响,极大地增加了信道分配问题的复杂度。因此,本文提出了一种易操作的双层博弈匹配算法,将这个复杂的信道分配问题简化为两层问题来解决,即第一层:CU 分配信道,基于多对一匹配博弈理论,采用蜂窝用户的信道分配算法求解;第二层:DU 复用 CU 的资源块,基于多对多匹配博弈理论,采用 D2D 用户的信道分配算法求解。最后再采用

迭代的方法分别解决第一层和第二层,即用双层博弈匹配算法求解该复杂的信道分配问题。

对于上述涉及多个对象相互作用的问题,匹配博弈理论是一种有效的工具。因此,分别建立基于考虑已存匹配的多对一匹配博弈理论,其中玩家是 CU 和信道代理商,和考虑已存匹配的多对多匹配博弈理论,其中玩家是 DU 和信道协调器。整个双层博弈匹配算法的架构如图 2 所示。接下来,将分析上述两层问题的求解过程。

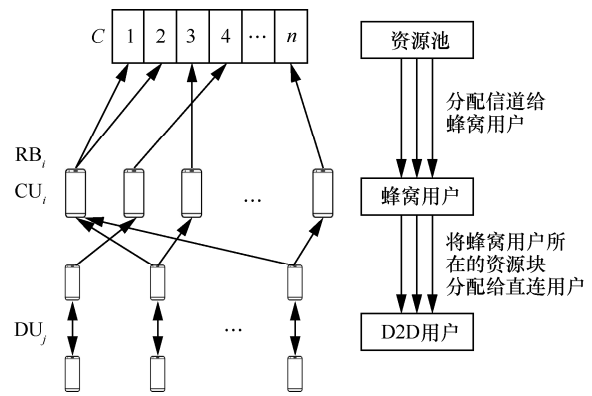


图2 算法整体匹配架构

### 4.1 蜂窝用户的信道分配算法

首先考虑建立 CU 和信道之间的匹配模型。假设蜂窝中信道集合为  $\mathcal{L}$ , 蜂窝用户为  $\mathcal{C}$ 。采用多对一匹配博弈理论来解决小蜂窝信道分配问题,参与匹配的双方分别为 CU 和信道资源代理商。由匹配博弈理论可知,参与匹配的双方中的个体对另一方中的个体存在偏好关系,它反映了该方在选择对方个体时的先后顺序。双方匹配时所进行的操作(匹配请求,接受/拒绝)都是依据偏好列表决定的。通常用符号  $\succ_m$  来表示个体  $m$  的偏好,例如  $l' \succ_{c_i} l$  表示相比于信道  $l$ , 用户  $c_i$  更愿意接入信道  $l'$ 。

**定义 1** 多对一匹配  $\mu^{[21]}$  是集合  $\mathcal{C} \cup \mathcal{L}$  到集合  $\mathcal{C} \cup \mathcal{L}$  的映射,对于  $\forall l \in \mathcal{L}, c \in \mathcal{C}$  有:

(1)  $|\mu(l)| = 1$ , 并且如果  $\mu(l) \notin \mathcal{C}$ , 则  $\mu(l) = l$ ;

(2)  $|\mu(c)| = \{1, 2, \dots, L\}$ , 并且如果  $\mu(c) \notin \mathcal{L}$ ,

则  $\mu(c) = c$ ;

(3) 当且仅当  $\mu(c)=l$ ,  $\mu(l)=c$ 。

因此, 数组  $\{\mathcal{C}, \mathcal{L}, \succ_c, \succ_l\}$  用来确定蜂窝网络信道分配问题, 其中  $\succ_c$  是蜂窝用户的偏好列表,  $\succ_l$  是指信道的偏好列表。为了更好地描述多对一匹配  $\mu$ , 在匹配博弈中定义的偏好列表是双边的。

在蜂窝用户侧, 每个 CU  $c_i$  可以占用多个信道, 寻求使自己的满意度函数最大化的接入方案。因此, CU  $c_i$  只向自己未占有的信道提出接入请求。假设每个 CU 每次都只向自己最偏好的信道提出请求, 直到匹配达到稳定。假设当前的信道分配方案是  $a = \{a_{c_1}, a_{c_2}, \dots, a_{c_i}\}$ ,  $a_{c_i}$  是指用户  $c_i$  占用信道的集合。CU  $c_i$  的满意度可以改写为  $u_i(a_{c_i}) = u_i(R_{c_i})$ 。

因此, 对于给定的信道  $l$  而言, CU  $c_i$  的效用  $\epsilon_{c_i}(l, a_{c_i})$  可以用式 (3) 表示:

$$\epsilon_{c_i}(l, a_{c_i}) = u_i(a_{c_i} + l) - u_i(a_{c_i}) \quad (3)$$

而  $u_i(a_{c_i} + l)$  是指  $c_i$  原有信道不变的情况下, 加入信道  $l$  之后  $c_i$  的满意度, 而式 (3) 是用分配信道  $l$  之后, 用户满意度的增量来表示在信道  $l$  上  $c_i$  效用。

对于  $CU_{c_i}$  来讲, 偏好关系  $\succ_{c_i}$  定义为, 对于任意两个信道  $l, l' \in \mathcal{L}$ , 且  $l \neq l'$ 。当且仅当  $\epsilon_{c_i}(l, a_{c_i}) > \epsilon_{c_i}(l', a_{c_i})$  时,  $l \succ_{c_i} l'$ 。

同理, 在信道侧, 每个信道都寻求自己对接入用户的满意度贡献最大。对于一个给定的用户  $c_i$ , 在信道  $l$  上的效用  $\epsilon_l(c_i)$  用式 (4) 表示:

$$\epsilon_l(c_i) = \begin{cases} u_i(a_{c_i} + l) - u_i(a_{c_i}), & l \notin a_{c_i} \\ u_i(a_{c_i}) - u_i(a_{c_i} - l), & l \in a_{c_i} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $u_i(a_{c_i} - l)$  是指 CU  $c_i$  离开信道  $l$  时的满意度。

对于信道  $l$  来讲, 偏好关系  $\succ_l$  定义为, 对于任意两个用户  $c_i, c_{i'}$ , 且  $i \neq i'$ 。当且仅当  $\epsilon_l(c_i) > \epsilon_l(c_{i'})$  时,  $c_i \succ_l c_{i'}$ 。

**定义 2** (阻塞个体) 对于  $\forall c_i \in \mathcal{C}$ ,  $\exists c_i \succ_{c_i} \mu(c_i)$ ; 对于  $\forall l \in \mathcal{L}$ ,  $\exists l \succ_l \mu(l)$ , 即相对于目前的匹配对象, 个体宁愿选择不匹配。

**定义 3** (阻塞对)  $\exists (c_i, l) \in \mathcal{C} \cup \mathcal{L}$ , 满足:

(1)  $l \succ_{c_i} \mu(c_i)$ ;

(2)  $c_i \succ_l \mu(l)$ 。

**定义 4** (稳定) 匹配  $\mu$  中不存在阻塞个体和阻塞对。

CU 的信道分配方案步骤如下。

**步骤 1** 初始化: 建立初始的匹配状态  $a$ 。

**步骤 2** 每个用户  $c_i$  都计算效用  $\epsilon_{c_i}(l, a_{c_i})$ , 并根据效用来更新自己的偏好  $\succ_{c_i}$ 。然后再向自己最偏好的信道发出请求, 并将其从偏好列表中去掉。

**步骤 3** 每个信道  $l$  ( $l \in \mathcal{C}$ ) 对所有提出接入请求的 CU 以及正在占用信道  $l$  的用户计算效用  $\epsilon_l(c_i)$ , 从而来更新自己的偏好列表  $\succ_l$ 。

**步骤 4** 随机选择一个信道  $l$  ( $l \in \mathcal{C}$ ), 从正在占用信道  $l$  的 CU 撤回信道  $l$ , 即  $a_{c_{i'}} = a_{c_{i'}} - l$ 。然后将信道  $l$  分配给自己最偏好的 CU  $c_{i^*}$ , 即  $a_{c_{i^*}} = a_{c_{i^*}} + l$ 。更新信道分配向量  $a$ 。

**步骤 5** 返回步骤 1, 直到系统中  $\notin [l, c]$ , s.t.  $l \succ_c \emptyset$  和  $c \succ_l \mu(l)$ , 即得到稳定的匹配  $\mu$ 。

## 4.2 D2D 用户的信道分配算法

接下来, 考虑建立 D2D 用户对 (DU) 和资源块 RB 之间的多对多匹配模型。在网络中, CU 和 DU 通过共享频谱资源来提高频谱和能量的利用效率, 但 D2D 通信会为蜂窝引进新的干扰。多个 DU 可以复用同一个信道, 一个 DU 也可以同时复用多个信道。因此, 利用同一个信道的 DU 和 CU 之间存在干扰, 利用同一个信道的 DU 之间也会存在干扰, 基于已存匹配的多对多匹配博弈理论来解决 DU 的信道分配的问题。

**定义 5** 多对多匹配<sup>[22]</sup>是集合  $\mathcal{D} \cup \text{RB}$  到集合  $\mathcal{D} \cup \text{RB}$  的映射, 对于  $\forall d_i \in \mathcal{D}$ ,  $\text{RB}_i \in \text{RB}$  有:

(1)  $|\mu(d_i)| \leq I$ , 并且如果  $\mu(d_i) \notin \text{RB}$ , 则  $\mu(d_i) = d_i$ ;

(2)  $|\mu(\text{RB}_i)| = q_{\max}$ , 并且如果  $\mu(\text{RB}_i) \notin \mathcal{D}$ , 则  $\mu(\text{RB}_i) = \text{RB}_i$ ;



(3) 当且仅当  $\mu(RB_i) = d_j$ ,  $\mu(d_j) = RB_i$ 。

这一类型的匹配叫做考虑已存匹配的匹配博弈算法, 即每个个体有一个建立在对方个体上的动态偏好列表, 这与传统上个体拥有固定的偏好列表的匹配算法不同<sup>[23]</sup>。在这个匹配模型中, 偏好列表是在某一匹配状态  $\mu$  时, 根据 DU 和 RB 的效用值建立的。

在匹配状态  $\mu$  时, 在  $RB_i$  上的  $DU d_j$  的效用是  $U_j(i, \mu)$ , 即  $U_j(i, \mu) = u(r_j^i)$ 。而 DU  $d_j$  的偏好列表是根据  $U_j(i, \mu)$  值的递减的顺序排列。在匹配状态  $\mu$  下, 使用同一个资源块  $RB_i$  的 D2D 用户对用集合  $\mathcal{S}$  来表示。定义  $RB_i$  的效用为所有占用它的 DU 和相应的 CU 效用之和, 即  $U_i(\mathcal{S}, \mu) = u(r_i) + \sum_{j \in \mathcal{S}} (r_j^i)$ 。而偏好列表也是根据  $RB_i$  的效用值, 即  $U_i(\mathcal{S}, \mu)$  递减的顺序排列的。

受到住房分配问题的启发, 提出一种将其拓展为多对多的匹配博弈算法。和传统的延迟接受算法不同, 本算法允许两个 D2D 用户对直接交换各自的资源块。为了更好地描述双方偏好的相互作用关系, 定义交换匹配的概念如下:

$$\begin{aligned} \mu_{ij}^{i'j'} = & \{\mu \setminus \{(j, \mu(j)), (j', \mu(j'))\}\} \cup \\ & \{(j, \{\{\mu(j) \setminus \{i\}\} \setminus \{j'\}\}), (j', \{\{\mu(j') \setminus \{i'\}\} \cup \{i\}\})\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $i \in \mu(j)$ ,  $i' \in \mu(j')$ ,  $i \notin \mu(j')$  且  $i' \notin \mu(j)$ 。换句话说, 交换匹配是允许 D2D 对  $D_j$  和  $D_{j'}$  交换它们相匹配的 RB 中的一个, 同时保持其他的 D2D 对和 RB 的匹配不变。需要注意的是, 参与交换的 DU 中有一个可以是空闲 RB, 用  $\emptyset$  来表示, 因此允许一个 DU 接入空位。同理, 参与交换的其中一个 RB 也可以是空穴。

基于交换匹配的概念, 交换阻塞对定义如下。

**定义 6** (交换阻塞对)  $(D_j, D_{j'})$  是一个交换阻塞对, 当且仅当:

- (1)  $\forall x \in \{i, i', j, j'\}, U_x(\mu_{ij}^{i'j'}) \geq U_x(\mu)$ ;
- (2)  $\exists x \in \{i, i', j, j'\}, U_x(\mu_{ij}^{i'j'}) > U_x(\mu)$ 。

交换操作是在交换阻塞对之间进行的, 条件 (1) 表明交换阻塞对  $(D_j, D_{j'})$  进行交换操作之后, 参与交换的个体包括资源块和 D2D 用户对的效用不能降低; 条件 (2) 表明至少一个个体的效用在交换之后效用会提高。值得注意的是, 空穴的效用和与空穴相匹配的个体无需考虑这两个条件。

DU 的信道分配方案具体步骤如下。

**步骤 1** 建立初始的匹配状态  $b$ , 每个 DU 为其匹配的 RB 分配能量。

**步骤 2** 每个  $DU d_j$  对其他的  $DU d_j$  所匹配的资源块和空闲的 RB 计算效用  $U_j(i, \mu)$ , 并根据效用更新自己的偏好  $\succ_{d_j}$ 。然后再向自己最偏好的资源块发出建立交换阻塞对的请求。

**步骤 3** 每个资源块  $RB_i$  对接收到的建立交换阻塞对请求的 DU 计算效用, 对满足建立交换阻塞对的 DU 的效用更新自己的偏好列表  $\succ_{RB_i}$ 。

**步骤 4** 每个资源块  $RB_i$  根据自己的偏好列表, 同意最偏好的用户的建立交换对的请求, 拒绝其他的用户。

**步骤 5** 更新匹配状态, 同时更新与每个资源块匹配的 DU 个数。

**步骤 6** 返回步骤 1, 直到系统中没有交换阻塞对, 即得到稳定的匹配  $\mu$ 。

#### 4.3 算法流程

结合以上 CU 和 DU 的信道分配方案, 完整的蜂窝—D2D 混合环境下双层博弈匹配的算法流程如下。

**步骤 1** 系统初始化, 建立初始的 CU 信道匹配向量  $a[0]$  和 DU 资源块匹配向量  $b[0]$ , 输入  $l \in \mathcal{L}, c_i \in \mathcal{C}, d_j \in \mathcal{D}$ 。

**步骤 2** 如果迭代次数不大于最大匹配次数, 即  $t \leq t_{\max}$  时, 执行步骤 3, 否则执行步骤 4。

**步骤 3** 利用第一层 CU 信道匹配方案, 更新分配向量  $a$ , 进而更新 RB。

**步骤 4** 根据步骤 1 匹配结果, 利用 DU 信道

匹配方案,更新分配向量  $b$ ; 返回步骤 2。

**步骤 5** 得到稳定的匹配结果。

综上所述,本文提出的双层博弈匹配算法的匹配流程如图 3 所示。

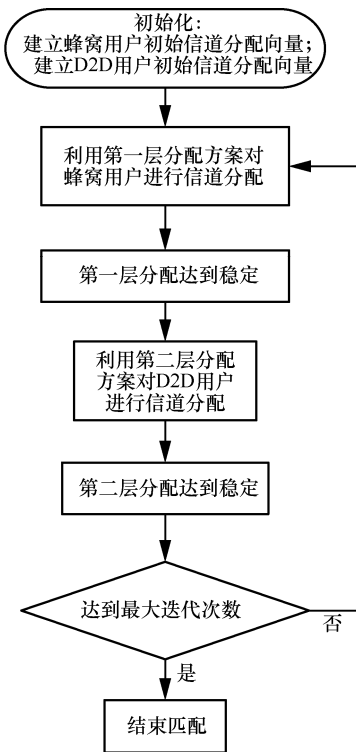


图3 算法的匹配流程

## 5 仿真实验

为了验证本文提出的双层博弈匹配算法的有效性,用 MATLAB 语言编写了本文算法的验证程序。在本仿真模型中,以 50 m 为半径的圆形区域内随机分布 CU 和 DU, DU 的接收端和发送端之间的最大距离为 20 m。其他系统仿真参数如下:算法最大迭代次数  $t_{\max}=20$ ; 路径衰减指数  $\alpha=4$ ; 路径衰减常数  $\beta=10^{-2}$ ; DU 发送端最大发送功率  $P_f=23$  dBm; CU 最大发送功率  $Q_f=23$  dBm; 信道带宽  $B=180$  kHz; 信道噪声功率  $N_0=-114$  dBm; 每个 DU 用户最大复用用户信道数为 2。

图 4 (a) 表示信道数为 6、DU 个数为 2 时系统总体效用 QoE 随 CU 个数 ( $N_{cu}$ ) 的变化曲线。

从中看出,随着蜂窝用户数的增加,系统总体效用也增加。图 4 (b) 表示 CU 个数为 4、DU 个数为 3 时系统总体效用 QoE 随信道个数 ( $N_{\text{channel}}$ ) 的变化。从中看出,随着信道个数的增加,系统总体效用也不断增加。而且,由图 4 可以看出,本文算法随着迭代次数的增加最后趋于稳定。

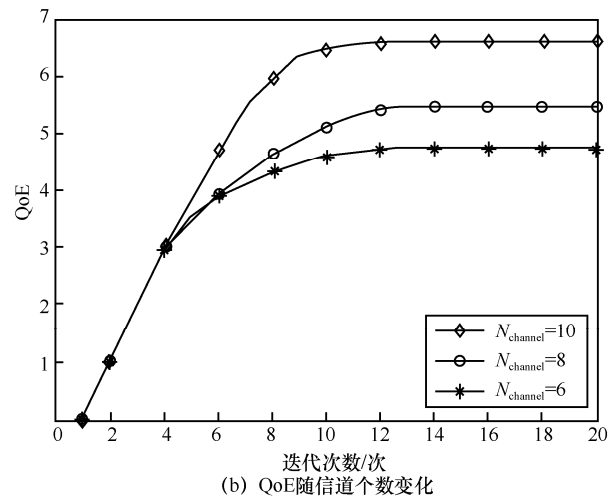
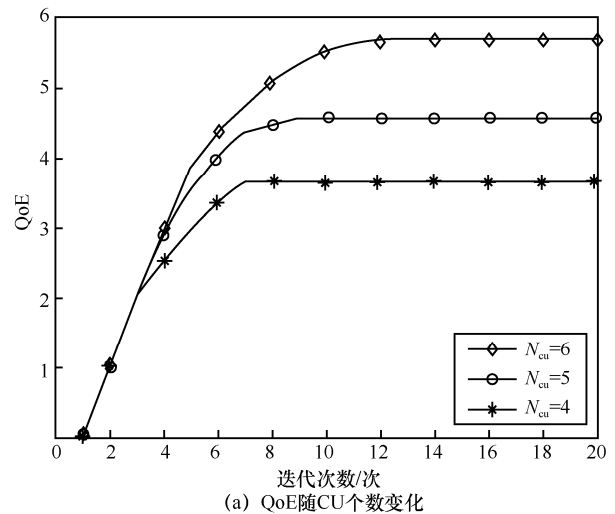


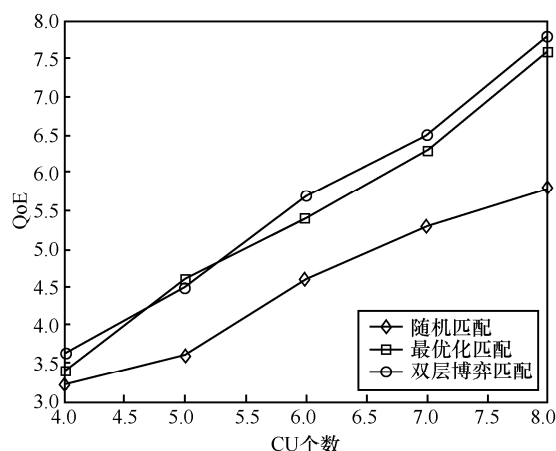
图4 本文算法性能随参数的变化曲线

接下来,将从有效性、稳定性、收敛性和复杂性几个方面分别将本文提出的双层博弈匹配的匹配算法(下文简称双层博弈匹配算法)与随机匹配算法和最优化匹配算法进行比较,分析本文提出的双层博弈算法的性能。

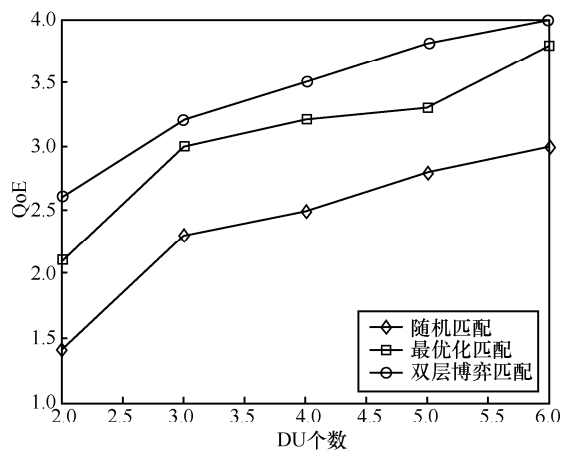
随机匹配算法以式(2)为优化模型,不考虑用户公平性,采用两两随机匹配的方法求解相应



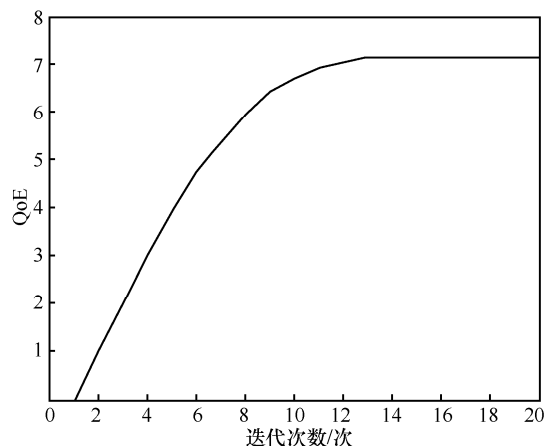
模型。最优化匹配算法以吞吐量为优化目标构建最优化模型,不考虑用户公平性,采用多对多匹配博弈理论求解相应模型<sup>[20]</sup>。3种算法的比较指标均采用本文定义的用户 QoE 指标。



(a) 3种算法性能随CU个数的变化比较



(b) 3种算法性能随DU个数的变化比较



(c) 本文算法的收敛性

图5 3种算法的性能比较

## (1) 有效性

本文的算法是以 QoE 为指标进行匹配优化的,将该算法与随机匹配和最优化匹配算法两种方法相比较。在图 5 (a) 中,在 DU 个数为 2、信道数为 10 时,比较 CU 个数变化后,每种算法的对应的 QoE 效用值。在图 5 (b) 中,当 CU 个数为 4、信道数为 8 时,比较 DU 个数变化后,每种算法对应的 QoE 效用值。由于最优化匹配算法不考虑用户公平性,能够实现总体吞吐量的最大化。在某些情况下(QoE 指标与总吞吐量呈递增关系时),最优化匹配算法性能更优(如图 5 (a) 第二个点);但在大多数情况下(QoE 指标与总吞吐量并不是简单的递增关系),而且双层博弈匹配算法是直接优化 QoE 指标,故双层博弈匹配算法性能将更优。由图 5 (a) 和图 5 (b) 可以看出,双层博弈匹配算法性能整体优于随机匹配算法和最优化匹配算法。

## (2) 收敛性和稳定性

该算法收敛为一个匹配  $\mu$ ,是双边稳定的匹配。在双层博弈匹配中如果  $\exists [l, c], \text{ s.t. } l \succ_c \emptyset$  和  $c \succ_l \mu(l)$ ,则匹配结束,说明算法最后匹配的结果是稳定的。由图 4 (a) 和图 4 (b) 以及图 5 (c),可以清晰地看出双层博弈匹配算法具有收敛性。

## 6 结束语

本文基于匹配博弈理论,结合 5G 环境的特点,提出了蜂窝—D2D 混合场景下面向 QoE 的双层博弈匹配算法,将复杂的信道分配问题分层进行解决。首先,建立了第一层蜂窝用户信道分配算法,然后建立了第二层 D2D 用户信道分配算法,从而形成整个算法解决所有用户信道分配的问题。这个过程中充分考虑了用户的公平性和用户之间复杂的干扰问题,同时改进了系统最优化目标函数,即效用函数,不再是一味追求高吞吐量,而是考虑用户的体验质量。本文算法是基于匹配博弈理论,因此匹配的结果是双边稳定的,而且

该算法不是集中式算法,而是分布式的,不依赖于参与匹配的终端和系统的拓扑结构,具有很好的有效性、收敛性和可行性。

## 参考文献:

- [1] GE X, TU S, MAO G, et al. 5G ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 72-79.
- [2] 陈晓贝, 魏克军. 全球 5G 研究动态和标准进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 16-19.  
CHEN X B, WEI K J. Global research and standardization progress of 5G [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 16-19.
- [3] 杨峰义, 张建敏, 谢伟良, 等. 5G 蜂窝网络架构分析[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 52-62.  
YANG F Y, ZHANG J M, XIE W L, et al. Analysis of 5G cellular network architecture [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 52-62.
- [4] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 156-162.  
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 156-162.
- [5] TAN L, ZHU Z, GE F, et al. Utility maximization resource allocation in wireless networks: methods and algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2015, 45(7): 1018-1034.
- [6] LI Y, JIN D. Coalitional games for resource allocation in the device-to-device uplink underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 13(7): 3965-3977.
- [7] ZUO S, HOU I H, LIU T, et al. Joint rate control and scheduling for real-time wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 12(1):1-10.
- [8] LIANG Y S, CHUNG W H, NI G K, et al. Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(5): 2243-2255.
- [9] NGO D T, KHAKUREL S, LE-NGOC T. Joint subchannel assignment and power allocation for OFDMA femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(1): 342-355.
- [10] WANG C, LIU Y, TAO M, et al. Stackelberg game for spectrum reuse in the two-tier LTE femtocell network[C]//Wireless Communications and Networking Conference, April 07-10, 2013, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1888-1892.
- [11] SUN Y, WANG J, SUN F, et al. Energy-aware joint user scheduling and power control for two-tier femtocell networks: a hierarchical game approach[J]. IEEE Systems Journal, 2016.
- [12] SUN Y, WANG J, SUN F, et al. Local altruistic coalition formation game for spectrum sharing and interference management in hyper-dense cloud-RANs[J]. IET Communications, 2016, 10(15): 1914-1921.
- [13] SONG L, HAN Z, XU C. Resource management for device-to-device underlay communication[M]. New York: Springer, 2014.
- [14] LIU J, KATO N, MA J, et al. Device-to-device communication in LTE-Advanced networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(4):1923-1940.
- [15] ZHOU Z, DONG M, OTA K, et al. Game-theoretic approach to energy-efficient resource allocation in device-to-device underlay communications[J]. Communications IET, 2014, 9(3): 375-385.
- [16] GALE D, SHAPLEY L S. College admissions and the stability of marriage[J]. American Mathematical Monthly, 2013, 120(5): 386-391.
- [17] GU Y, SAAD W, BENNIS M, et al. Matching theory for future wireless networks: fundamentals and applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(5): 52-59.
- [18] ELHAJJ A M, DAWY Z, SAAD W. A stable matching game for joint uplink/downlink resource allocation in OFDMA wireless networks[C]//2012 IEEE International Conference on Communications, Jun 10-15, 2012, Orléans, ON, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2012: 5354-5359.
- [19] ZHOU Z Y, MA G, DONG M, et al. Iterative energy-efficient stable matching approach for context-aware resource allocation in D2D communications[J]. IEEE Access, 2016(4): 6181-6196.
- [20] 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, 2016, 6(1): 3452-3458.
- [21] LONG C, ZHAO H, BAO L, et al. Resource allocation algorithm based on stable matching in hierarchical cognitive radio networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(11): 123-128.
- [22] HOLFELD B, JORSWIECK E. On stable many-to-many matching for distributed medium access with reuse of spectral resources[C]//The 20th International ITG Workshp on Smart Antennas (WSA 2016), March 09-11, 2016, Munich, Germany. Berlin: VDE Verlag, 2016: 536-543.
- [23] 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.

## [作者简介]



姚天(1995-), 女, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为 5G 资源配置。

张晖(1982-), 男, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为下一代网络。