



研究与开发

基于合同理论的 D2D 数据协作转发机制

周进¹, 张陆洋¹, 杨鹏²

(1. 中国信息通信研究院西部分院(重庆信息通信研究院), 重庆 400065;

2. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要: 针对蜂窝网络控制下的终端直通(D2D)通信中的数据转发问题, 提出了一种基于合同理论的 D2D 数据协作转发机制。首先, 充分考虑用户的自私特征, 构建了一种以 D2D 发送用户为合同委托方、以空闲用户为代理方的委托—代理模型。然后, 利用合同双方的效用函数以及合同约束条件构建含约束条件的优化问题, 并且将合同双方的效用函数转化为合同双方满意度, 最后构建为最小权重的稳定匹配, 从而获得最优合同解。仿真结果表明, 所提出的算法能够较好地激励空闲用户参与协作通信, 进而提升用户满意度以及吞吐量。

关键词: 终端直通信; 合同理论; 稳定匹配; 数据转发

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018244

D2D data collaboration forwarding mechanism based on contract theory

ZHOU Jin¹, ZHANG Luyang¹, YANG Peng²

1. The Western Branch of China Academy of Telecommunication Research

(Chongqing Academy of Information and Communications Technology), Chongqing 400065, China

2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: A contract theory-based D2D data forwarding mechanism was proposed for device-to-device (D2D) communications under cellular networks. Firstly, considering the selfishness of users, a model of principal-agent was constructed, which regarded the transmitter user as principal and the idle user as agent. Then, the utility function of the contract was used to construct the optimization problem with the constraint condition. Meanwhile, the utility function of the two sides was converted into the satisfaction degree of the two sides of the contract. Finally, the stable matching with the minimum weight was constructed to obtain the optimal contract solution. The simulation results show that the proposed mechanism can better encourage the idle user to participate in collaborative communication so as to enhance the user's degree of satisfaction and throughput.

Key words: device-to-device communication, contract theory, stable matching, data forwarding

1 引言

随着移动用户数量和无线数据业务需求量的急剧增长,有限的频谱资源和人们日益增长的数据业务需求已经成为移动通信中的主要矛盾。根据 2016 年 2 月的思科视觉网络指数^[1],2020 年蜂窝通信网络中的数据业务量将会是 2015 年的 9 倍。为了迎合数据业务的急剧增长、充分地利用网络资源,终端直通(device-to-device, D2D)通信被提出。其中,D2D 通信可以在基站的控制下完成数据的直接传输,是未来蜂窝网络中必不可少的一项关键技术。此种通信方式不但减小了用户需求对基站造成的严重负载、降低了用户终端的传输时延和能耗,还可以增加数据的传输效率、扩大系统容量和覆盖范围、提升资源利用率等^[2-4]。

然而,由用户携带的终端具有较强的自私性,对数据转发带来较大负面影响,甚至将导致网络性能下降 20%。一般来说,用户的自私行为主要有两个方面的原因:客观原因和主观原因。其中客观原因包括用户缓存不足、能量有限、个人利益等,用户受到上述客观因素影响所表现出的自私行为导致其拒绝接收新到来的数据,从而无法为其他用户提供数据转发服务;此外,社会关系强度、信任程度、活跃度及个人隐私保护等主观因素也将使得用户表现出自私行为,导致其消极转发其他用户的数据。可见,需要设计合理的激励机制,使自私用户的协作意愿提升,从而更加积极地帮助基站进行视频数据转发,同时,保障基站和用户双方利益的最大化。

针对 D2D 协作数据转发问题,参考文献[5]提出了一种基于拍卖机制的数据分发策略,通过在基站和用户之间构建交易网络,从而构建为整数规划问题,然后通过组合拍卖方法求解该优化问题。参考文献[6]通过计算用户的动态特征,以合理的定价机制提升用户的满意度,从而减少数

据传输的时延。参考文献[7]充分地分析了用户在 D2D 机会投递中接收和转发的利益关系,从而构建了用户利益模型,然后通过博弈来降低用户的自私行为。然而,现有的理论研究都主要集中在“一方主导,一方跟从”的博弈过程下制定激励转发策略,例如主从博弈(Stackelberg game),没有对等地考虑到双方的意愿选择最佳的中继用户。参考文献[8]提出了基于合同理论的无线网络激励机制的综述,通过分析验证了合同理论在无线网络激励机制研究的适用性。

为了解决以上问题,本文提出一种基于合同理论的 D2D 数据协作转发机制。首先,以发送用户为合同委托方,以空闲用户作为合同代理方建立委托—代理合同模型。然后,根据用户协作转发功率以及付出的奖励计算合同双方效用函数,同时结合合同约束条件求解最优合同对应的数据转发策略。在求解最优合同的过程中结合双方用户意愿,将合同双方的效用函数转化为对应的偏好顺序,从而得到稳定匹配的最优合同数据转发策略。最后,对于部分未获得较高满意度的 D2D 用户,采用重新提高报价的模式再次向未匹配的空闲用户发送申请,从而进一步提高用户的满意度。

2 系统模型

基于合同理论的协作数据转发模型如图 1 所示,当 D2D 发送用户需要传输数据给目标用户时,会将该数据转发任务以合同的形式广播给邻近的空闲用户。为了减少不满足中继条件的空闲用户参与竞争合同,本文设定用户发布合同进行广播时的覆盖范围,使得用户发布的合同只能被该用户通信范围内的空闲用户检测到。空闲用户收到发送用户的合同请求以后,会根据自身获得的效用函数选择是否接受该合同请求。当系统中有多个空闲用户时,空闲用户就会将参与协作数据转发的功率值反馈给 D2D 发送用户并竞争该合同,



从而 D2D 发送用户就可以根据协作转发功率值计算该合同对应的效用函数，并且从多个竞争用户中选择效用最大的空闲用户作为中继。对于空闲用户，由于系统中存在多个发送用户，因此，空闲用户同一时间也可以参与竞争多个合同。这样，D2D 发送用户可以广播合同给多个空闲用户，空闲用户也可以参与多个用户合同的竞争。

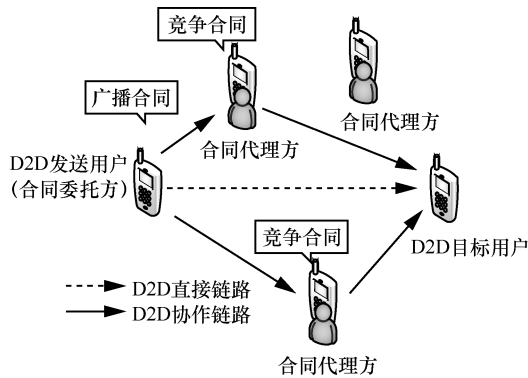


图 1 基于合同理论的协作数据转发模型

在中继协作传输方式中，发送用户与目标用户间的传输速率往往取决于信道条件较差的那一条，也即传输速率取决于两条链路间较低的传输速率。在协作通信中，由于第一跳由发送用户传输数据，其功率往往比较容易控制，使得数据的传输速率可以满足要求。对于第二跳，中继用户的转发功率将直接影响第二跳数据的传输速率，而发送用户又无法决定中继用户的发送功率，因此，中继协作通信模式下数据传输速率往往取决于第二跳的速率^[9]。假定 D2D 发送用户（合同委托方）与目标用户分别为 u_i 和 u_j ，中继协作用户（合同代理方）为 u_k ，且复用蜂窝用户 c 的信道。由于复用蜂窝用户 c 的信道，所以在进行 D2D 通信时，除了会受到白噪声的干扰，还会受到蜂窝用户 c 的干扰。那么，D2D 发送用户通过中继协作传输的速率如式（1）所示：

$$R_{u_i, u_j} = R_{u_k, u_j} = B \log \left(1 + \frac{p_{u_k} h_{u_k, u_j}^2}{p_c h_0^2 + N_0} \right) \quad (1)$$

其中， B 表示系统的信道带宽， p_c 和 p_{u_k} 分别表

示蜂窝用户 c 和中继用户的发射功率， h_0 和 h_{u_k, u_j} 分别表示蜂窝链路和第二跳链路的衰减系数， N_0 表示加性高斯白噪声。

3 基于合同理论的协作数据转发模型

如前所述，当 D2D 发送用户需要将数据转发给目标用户时，发送用户作为合同委托方会将该请求以合同的形式广播给邻近用户，该合同包含最低要求的数据传输速率以及给予协作用户的奖励，邻近空闲用户作为合同代理方，一旦收到合同请求，会根据合同委托方给予的奖励以及履行合同所需消耗的成本，从而计算该合同所带来的效用函数，由此决定是否接受该合同；然后，合同委托方会根据合同代理方反馈的协作转发功率值以及付出的奖励计算自身的效用函数。最后，通过合同的效用函数以及多个约束条件构建最优合同问题的求解模型。

3.1 合同双方效用函数

在合同理论中，合同双方在建立合同前都会衡量该合同自身所能获得的效用，从而决定是否签订该合同，本文中合同双方用户主要根据用户参与合同获得的收益以及为合同付出的成本来计算各自的效用函数。用户通过计算参与不同合同的效用函数，然后根据不同的效用合同选择最高效用合同。

针对合同委托方，D2D 用户直接转发数据时往往会存在信道条件比较差的情况，从而影响数据转发速率，如果借助中继用户进行协助转发则会改善数据传输性能。由于有空闲用户作为中继协作转发，使得数据可以快速转发给目标用户，这样合同委托方用户就会获得更高的数据传输速率。同时，为了激励空闲用户协作转发数据，合同委托方也会给予参与竞争的空闲用户一定奖励。那么，合同委托方的效用函数就可以通过传输速率的提升与付出的奖励计算，衡量方式如式（2）所示：

$$U_{i,k}^P = \phi R_{u_k, u_j} - T(u_k) \quad (2)$$

其中, R_{u_k, u_j} 为合同委托方采用中继协作传输的速率, 该速率取决于合同代理方协作转发的功率大小。 ϕ 为传输速率的权重系数, $T(u_k)$ 为合同代理方获得的奖励。

空闲的中继用户作为合同的代理方, 在进行中继协助 D2D 通信的过程中, 由于自身协助发送用户转发数据会产生能量消耗, 因此, 中继用户的成本开销体现在能量消耗上。另一方面, 为了激励更多的用户参与协作转发, 合同委托方也会给空闲用户一定奖励, 用户参与协作转发数据的同时自身也可以获得一定奖励。综上所述, 合同的代理方的效用函数主要表现在合同委托方给予的奖励以及协助数据转发产生的能量消耗上, 计算方式如式 (3) 所示:

$$U_{i,k}^A = \phi T(u_k) - \pi(P_{u_k}) \quad (3)$$

其中, ϕ 为合同代理方获得奖励的权重系数, $\pi(P_{u_k})$ 为合同代理方的能量消耗, 与中继用户的转发功率的有关。

3.2 合同约束条件

一个有效合同的建立必须同时满足合同的个体理性 (individual rationality, IR) 条件以及激励相容 (incentive compatibility, IC) 条件^[10], IR 条件主要是保证用户在签订合同时效用非负, 也即用户的行为是理智的, 在接受合同前会充分考虑自身效用; IC 条件主要是保证用户有多个合同可供选择时, 用户会选择效用最大的合同。此外, 为了保证 D2D 协作通信中数据传输服务的质量, 合同还包括用户链路的信噪比约束条件。

首先, 针对合同委托方发布的合同, 参与竞争的合同代理方会考虑自身效用函数, 合同 IR 条件要求满足合同代理方的效用函数是非负的, 这样可以防止部分用户进行恶性竞争而不考虑自身利益。结合合同代理方的效用函数, 合同的 IR 条件如式 (4) 所示:

$$U_{i,k}^A = \phi T(u_k) - \pi(P_{u_k}) \geq 0 \quad (4)$$

其次, 对于合同 IC 条件, 主要针对合同委托方有多个合同可供选择时, 会选择效用最大的合同, 因此合同的 IC 条件主要是针对合同委托方效用函数的约束, 合同的 IC 条件如式 (5) 所示:

$$\phi R_{u_i, u_k^*} - T(u_k^*) \geq \phi R_{u_i, u_k} - T(u_k) \quad (5)$$

其中, u_k^* 表示合同委托方选择最大效用函数合同对应的代理用户。

最后, 针对用户链路的信干噪比约束条件, 为了保证合同代理方能够满足用户的服务质量, 要求合同代理方以及 D2D 接收方的信噪比能够满足最低门限值。用 $\gamma_{i,k}$ 表示合同代理方的信干噪比, 用 $\gamma_{k,j}$ 表示 D2D 接收端用户的信噪比, 则对应的信干噪比约束条件如式 (6) 所示:

$$\begin{aligned} \gamma_{i,k} &= \frac{P_i |h_{i,k}|^2 d_{i,k}^{-\alpha}}{P_c |h_{c,k}|^2 d_{c,k}^{-\alpha} + N_0} \geq \gamma_0 \\ \gamma_{k,j} &= \frac{P_k |h_{k,j}|^2 d_{k,j}^{-\alpha}}{P_c |h_{c,j}|^2 d_{c,j}^{-\alpha} + N_0} \geq \gamma_0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, γ_0 表示用户的信噪比阈值, P_c 和 P_i 以及 P_k 分别表示蜂窝用户、合同委托用户以及合同代理用户的发送功率, N_0 表示加性高斯白噪声, α 为路损因子, h 为对应不同链路的衰落系数, d 表示不同用户间的距离。

4 最优合同数据转发策略

如前所述, 合同委托方通过广播合同的形式激励邻近空闲用户参与合同的竞争, 为了让合同双方能够通过签订合同并获得最佳效用, 结合用户的效用函数以及 IR 条件、IC 条件等约束条件, 可以将上述问题转化为单目标多条件约束的优化问题, 其中合同委托方的效用函数为目标函数, IR 条件、IC 条件以及链路信噪比约束条件为优化问题的约束条件, 具体优化问题模型如式 (7) 所示:

$$\begin{aligned} \max \quad & U_{i,k}^P = \phi R_{u_k, u_j} - T(u_k) \\ \text{s.t.} \quad & \text{IR, IC, SINR} \end{aligned} \quad (7)$$



在上述优化问题中, 目标函数与中继用户协作传输的速率和给予中继用户的奖励有关。考虑实际情况, 合同委托方给予代理方的奖励将取决于合同代理方在协作过程中的努力程度, 也即合同代理方提供的转发功率越大, 给合同委托方带来的速率增益越大, 就会获得更多的奖励。由此, 可以将合同委托方给予的奖励定义为合同代理方转发功率的线性函数, 也即 $T(u_i) = \varepsilon p_k$, 其中 ε 表示对应转发功率系数。那么, 合同委托方的效用函数就仅和合同代理方的协作转发功率有关。对合同委托方效用函数求导, 找到极值点, 则可以找出合同委托方最大效用函数对应合同代理方的转发功率。这样合同委托方在选择代理用户时就可以依据代理用户的发送功率。

上述问题中, 优化问题的目标函数根据合同委托方的效用函数建立, 然而单方面考虑合同委托方的利益不利于整个系统的利益, 而且作为参与协作数据转发的中继用户的利益也会受到影响。因此, 为了综合考虑合同委托方与代理方的利益, 引入匹配理论的思想。如图 2 所示, 将合同委托方与合同代理方作为二分图对应的两个节点集合, 合同委托方与合同代理方的效用函数作为二分图边的权重, 从而构建带有权重的二分图匹配问题。

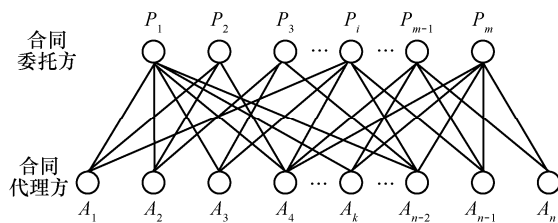


图 2 基于合同双方效用函数的二分图稳定匹配模型

在图 2 所示的二分图匹配模型中, 虽然凭借合同双方的效用函数, 可以获得最大权重匹配, 但是用户间存在自私特性且会表现出相应的偏好, 本文将充分考虑用户的协作意愿, 采用盖尔—沙普利 (Gale-Shapley, GS) 算法解决上述匹配

问题^[11]。其中, 合同双方的偏好如定义 1 所示。然后, 合同委托方根据自己的偏好顺序依次向合同代理方发送请求, 而合同代理方则根据接收到的合同请求先暂时接受, 如果在第二轮有效用函数更高的合同则重新接受新的合同。合同委托方如果在第一轮请求中被拒绝, 则继续依据偏好顺序向剩余代理方发送合同请求, 直到所有发送用户都获得合同, 通过多轮选择以后最终达到一种稳定匹配的状态。其中稳定匹配如定义 2 所示。

定义 1 合同委托方 u_i 针对合同代理方 u_k 和 $u_{k'}$, 更加偏好 u_k , 当且仅当满足 $U_{i,k}^A \geq U_{i,k'}^A$ 时, 表示为 $u_k \succ_{u_i} u_{k'}$; 同理, 合同代理方 u_k 针对合同委托方 u_i 和 $u_{i'}$, 更加偏好 u_i , 当且仅当满足 $U_{k,i}^P \geq U_{k,i'}^P$ 时, 表示为 $u_i \succ_{u_k} u_{i'}$ 。

定义 2 当且仅当不存在用户阻塞匹配对 (u_i, u_k) , 且同时满足 $u_k \succ_{u_i} u_{k'}$, $u_i \succ_{u_k} u_{i'}$ 时, 匹配 M 为稳定匹配, 其中 $u_{k'}$ 是合同委托方 u_i 当前的匹配用户, $u_{i'}$ 是合同代理方 u_k 当前匹配的用户。

通过上述关于稳定匹配的定义, 建立稳定匹配的伪代码如下所示。

算法 1 稳定匹配

输入: 合同委托方和代理方的偏好列表

l^P, l^A

输出: 最优匹配方案 M

设置匹配列表 $M_{\text{craw}} = \{u_i, \forall u_i \in P\}$

while $M_{\text{craw}} \neq \emptyset$ do

if u_k 相比于 u_i 和 $u_{i'}$, u_k 更偏向于选择 u_i

then

u_k 拒绝 $u_{i'}$, 选择 u_i ;

$u_{i'}$ 从列表中删除, u_i 加入 M_{craw} ;

else

u_k 拒绝 u_i , 选择 $u_{i'}$;

end if

end while

输出稳定匹配 M

根据算法 1 可以得到基于合同委托方最优的稳定匹配, 然而, 如果让合同代理方优先发送合同请求, 则可以得到基于合同代理方最优的稳定匹配。因此, 合同中委托方与代理方采用不同的请求顺序将会得到不同的稳定匹配, 而且上述匹配中存在多个稳定匹配, 导致难以找到稳定匹配中的最优匹配。为了真实地反映用户的合作意愿, 可以将用户的偏好顺序转化为满意度。由于用户对请求用户的偏好顺序越靠后, 对应的满意度越低, 因此, 用户的满意度函数必定为严格单调递减函数。此外, 在现实生活中, 用户的偏好顺序和满意度不一定存在简单的线性关系。下面给出用户满意度的定义。

定义 3 合同委托方对合同代理方的满意度为 $\theta(u_{i_x}, u_{k_y}) = \chi(\text{rank}(u_{i_x}, u_{k_y}))$, 其中, $\text{rank}(u_{i_x}, u_{k_y})$ 表示合同委托方 u_{i_x} 根据对其满意度设置合同代理方的偏好顺序; 合同代理方对合同委托方的满意度为 $\theta(u_{k_y}, u_{i_x}) = \chi(\text{rank}(u_{k_y}, u_{i_x}))$, 其中, $\text{rank}(u_{k_y}, u_{i_x})$ 表示合同代理方 u_{k_y} 根据对其满意度设置合同委托方的偏好顺序。

定义 3 中, $\chi(\cdot)$ 函数为单调递减函数, 且 $0 < \chi(\cdot) \leq 1$, $\chi(1) = 1$ 。一般情况, 用户的心理因素对用户的满意度影响较大, 那么要求用户满意度函数的二阶导数满足 $\chi''(\cdot) \geq 0$ 。综合以上分析, 将用户的满意度函数定义为:

$$\chi(x) = \frac{1}{x} \quad (8)$$

根据式 (8), 可以将合同双方用户的偏好顺序排名转化为用户的满意度, 可知当合同委托方获得使得自身最大效用的合同时, 其满意度为 1, 然后, 根据获得合同的效用大小依次得到其他合同委托方用户的满意度。同理, 对于合同代理方, 也是将不同合同的效用大小顺序转化为其对合同委托方的满意度。其次, 通过将合同双方用户满意度转化为二分图的权重, 从而将上述问题构建

为一个最小权重稳定匹配问题, 通过求解该稳定匹配的最优匹配, 可以尽可能让更多的用户获得较为理想的合同效用。

根据 GS 算法, 上述最优匹配问题至少存在一个稳定匹配结果。那么, 在保证合同双方匹配稳定的前提下, 可以建立以用户满意度为目标函数的最优稳定匹配模型, 具体优化模型如式 (9) 所示:

$$\begin{aligned} \max Z_1 &= \sum_{i=1}^m \theta(u_i, u_k) \rho_{ik} \\ Z_2 &= \sum_{k=1}^n \theta(u_k, u_i) \rho_{ik} \\ \text{s.t. C1: } &\sum_{k=1}^n \rho_{ik} = 1, k \in K, \rho_{ik} \in \{0, 1\} \\ \text{C2: } &\sum_{i=1}^m \rho_{ik} \leq 1, i \in I, \rho_{ik} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, K 表示代理方集合, I 表示委托方集合。式 (9) 中约束条件 C1 表示针对每一个合同委托方, 都有且仅有一个合同代理方与之匹配, 约束条件 C2 表示针对每一个合同代理方, 至多有一个合同与之匹配, 这主要是由于本文给定的场景中代理方用户数多于委托方用户数。该模型为典型的多目标优化问题, Z_1 是从合同委托方的角度, 目标是使得合同委托方的用户满意度最大, Z_2 对应的目标函数则是使得合同代理方的用户满意度最大。为了简化问题模型, 采用线性加权的方法整合合同双方用户的满意度。考虑到合同双方的公平性, 将合同委托方与合同代理方的满意度权重设定为相同值, 上述多目标优化问题就可以转化为单目标优化问题, 优化模型如式 (10) 所示:

$$\begin{aligned} \max & 0.5 \sum_{i=1}^m \theta(u_i, u_k) \rho_{ik} + 0.5 \sum_{k=1}^n \theta(u_k, u_i) \rho_{ik} \\ \text{s.t. } & \text{C1, C2} \end{aligned} \quad (10)$$

该优化模型问题中的约束条件都是简单的线性约束条件, 因此, 可以采用线性规划的方法求解基于合同双方用户满意度最大的最优稳定匹配^[12]。



5 数值分析

本节基于 MATLAB 仿真平台对本文所提出的算法进行数值分析,并结合 INFOCOM2006 真实数据集对该算法进行仿真验证。仿真环境同样采用单小区模型,用户随机分布在半径为 500 m 的小区。数据在转发过程中,源用户与目标用户随机进行分配,系统中的空闲用户同样是随机分布。D2D 用户数是总的 D2D 用户数量,而空闲用户数表示可以参与 D2D 通信且当前没有参与 D2D 通信的用户数量。仿真参数设计中,将 D2D 用户最大通信范围设定为 50 m,具体仿真参数见表 3。

表 3 仿真参数

仿真参数	参数值
噪声功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
系统带宽/MHz	20
D2D 用户数/个	78
用户移动速度/(m·s ⁻¹)	3
数据生存时间/min	10
用户满意度阈值	0.125
基站发送功率/dBm	46
D2D 用户发送功率/dBm	23

为了验证本文提出的基于合同理论满意度匹配的数据转发(satisfaction matching contract theory-based data forwarding, SM-CTDF)对系统性能的影响,本文给出了两种对比数据转发算法,包括 D2D 直接数据转发(direct data forwarding, DDF)机制以及基于相似度的数据转发(similarity-based data forwarding, SSFDF)机制。其中 DDF 机制主要依靠用户的随机移动和目标用户相遇后转发数据,而 SSFDF 机制在选择中继过程中主要依据用户的社会关系选择信任度高的用户作为中继。仿真性能参数包括 D2D 用户吞吐量、数据投递率以及用户满意度。其中数据投递率表

示成功投递数据数量占总生成数据数量的比值。

图 3 给出了在不同数据协作转发算法下的 D2D 用户吞吐量变化情况。由图 3 可知,随着 D2D 用户数的增加,3 种数据转发算法的吞吐量都会相应地增大。首先,针对直接数据投递机制,用户的随机移动性以及通信范围有限,使得直接投递数据会受到较大影响,从而导致用户吞吐量会很低。SSFDF 机制由于仅仅选择社会关系较为紧密的用户作为中继,因此只有部分用户可以满足协助转发的条件。而对于本文的基于合同理论的 SM-CTDF 机制,由于采用合理的激励机制,使得更多的空闲用户参与协作数据转发,这样发送用户就可以选择信道条件较好的用户作为中继以更高的速率传输数据,进而提高 D2D 用户的吞吐量。

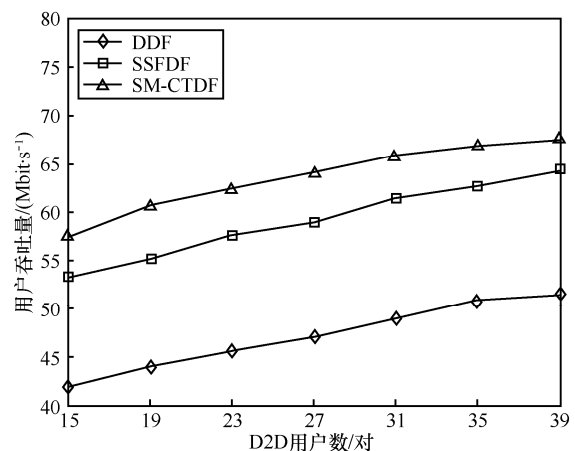


图 3 D2D 用户吞吐量随用户数的变化情况

图 4 给出了在不同空闲用户密度情况下各个算法的吞吐量对比情况。当空闲用户密度增大时,也即对应每个 D2D 发送用户将会有更多的中继选择,从而可以获得更高的传输速率。由图 4 可知,空闲用户密度最大时,对应的吞吐量最大。此外,当 D2D 用户数逐渐增加时,空闲用户密度最大场景下吞吐量增速趋于平缓甚至降低,这主要是由于用户增加以及空闲用户密度增大,更多用户参与竞争合同,会增加额外的计算开销,使得用户需要更多时间用于竞争合同,减少了数据传输时间。

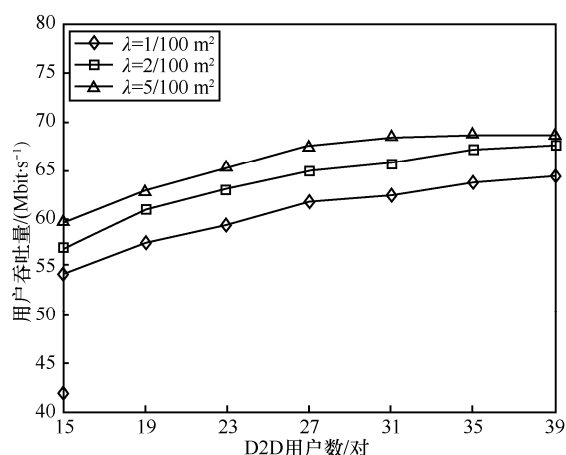


图4 用户吞吐量在不同空闲用户密度下随用户数变化情况

图5给出了随着D2D用户对的增加,不同算法的数据投递率变化情况。在基站覆盖区域不变的情况下,D2D用户增加则将会有更多的发送用户与目标用户处于彼此的通信范围以内,从而提高数据投递率。本文提出的算法由于采用合同理论激励空闲用户参与协作转发数据,使得更多的空闲且信道条件良好的用户能够作为备选中继,进而提高数据投递率。其中,图5中的SI-CTDF是使用穷举法求得最后匹配结果,该方法虽然能求得绝对最优解,但是用户数非常大的时候不太适用。

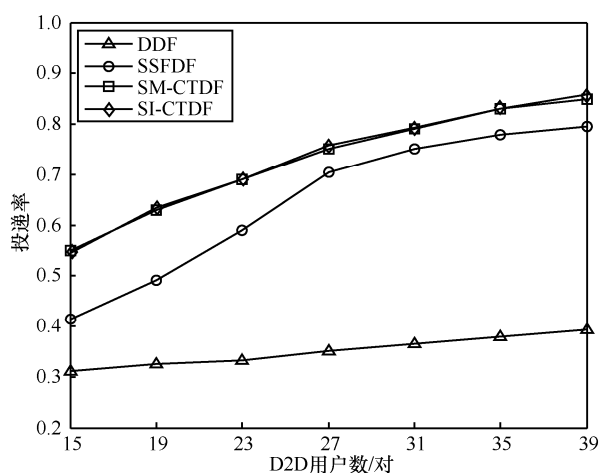


图5 系统投递率随D2D用户数变化情况

6 结束语

本文提出了一种基于合同理论的D2D数据转发机制,主要建立用户协作数据转发模型,通过

在用户间进行建立合同关系激励空闲用户协作转发数据。仿真结果表明,本文提出的算法能够有效激励空闲用户参与协作转发,提高D2D数据投递率。此外,通过空闲用户作为中继协作转发数据,可以使得用户获得数据转发速率增益,从而增大整个D2D用户的吞吐量。

参考文献:

- [1] 张建敏, 谢伟良, 杨峰义, 等. 基于MEC的LTE本地分流技术[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 154-163.
ZHANG J M, XIE W L, YANG F Y, et al. Traffic offloading technology in LTE network using MEC[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 154-163.
- [2] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOME H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86-92.
- [3] WU D P, YAN J J, WANG H G, et al. Social attribute aware incentive mechanism for device to device video distribution[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(5): 86-98.
- [4] GAO C F, TANG J, SHENG X, et al. Enabling green wireless networking with device-to-device links: a joint optimization approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(4): 2770-2779.
- [5] ZHU Y F, JIANG J J, LI B, et al. Rado: a randomized auction approach for data offloading via D2D communication[C]//IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, October 19-22, 2015, Shenzhen, China. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-9.
- [6] ZHUO X, GAO W, CAO G, et al. An incentive framework for cellular traffic offloading[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(3): 541-555.
- [7] WANG T, SUN Y, SONG L, et al. Social data offloading in D2D-enhanced cellular networks by network formation games[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 7004-7015.
- [8] ZHANG Y R, PAN M, SONG L Y, et al. A survey of contract theory-based incentive mechanism design in wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(3): 80-85.
- [9] GU Y N, ZHANG Y R, 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.
- [10] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. A stable matching algorithm for resource allocation for underlaying device-to-device communications[C]// IEEE International Conference on Communications, July 25, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 752-757.
- [11] ZHOU Z Y, MA G F, DONG M X, et al. Iterative energy-efficient stable matching approach for context-aware re-



source allocation in D2D communications[J]. IEEE Access, 2016, 22(4): 6181-6196.

- [12] SHI J F, CHEN M, YANG Z H, et al. Power control and performance analysis for full-duplex relay-assisted D2D communication under laying fifth generation cellular networks[J]. IET Communications, 2017, 11(18): 2729-2734.

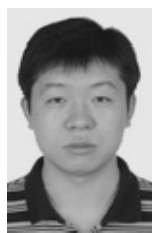
[作者简介]



周进（1985-），男，中国信息通信研究院西部分院（重庆信息通信研究院）工程师、测试业务部主任，主要从事移动通信、无线通信、智能硬件、人工智能和工业互联网等领域的技术研究工作。



张陆洋（1988-），男，中国信息通信研究院西部分院（重庆信息通信研究院）测试业务部副主任，主要从事信息通信和工业互联网技术方面的研究工作。



杨鹏（1980-），男，博士，中国信息通信研究院高级工程师，主要研究方向为泛在下一代移动通信技术、无线泛在网络、下一代互联网理论与技术。