

基于联盟博弈的 D2D 网络资源分配算法研究 *

陈雨洁, 马彩虹

(武警工程大学 信息工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 无线网络中用户数激增使得现有网络架构面临巨大挑战, 如何有效提升系统容量是当前亟待解决的问题。作为 5G 发展中的关键技术, 终端直连(Device-to-Device, D2D)通信和稀疏码多址(Sparse Code Multiple Access, SCMA)技术凭借在增大系统容量上的优越性受到了广泛研究。针对 SCMA 系统中 D2D 通信的资源分配问题, 以最大化系统吞吐量并保证用户最低门限速率为目, 将其建模为联盟博弈进行求解。由于传统的联盟博弈算法存在复杂度高、收敛速度慢等问题, 提出建立优先级指导联盟初始化及形成过程, 从而减少算法迭代次数, 降低系统复杂度。最后, 通过仿真验证了算法的可行性。

关键词: 5G; SCMA; D2D; 资源分配; 博弈论

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211719

中文引用格式: 陈雨洁, 马彩虹. 基于联盟博弈的 D2D 网络资源分配算法研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 51-54, 59.

英文引用格式: Chen Yujie, Ma Caihong. Research on resource allocation algorithm in D2D networks based on alliance game[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 51-54, 59.

Research on resource allocation algorithm in D2D networks based on alliance game

Chen Yujie, Ma Caihong

(School of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

Abstract: The rapid increase in the number of users in wireless networks has brought huge challenges to the existing network architecture, and how to increase the system capacity effectively is an urgent problem to be solved. Due to the superior performance in improving spectrum efficiency and increasing system capacity, Device-to-Device(D2D) communication and sparse code multiple access(SCMA) as the key technics in the development of 5G in the future have been extensively studied. Aiming at the communication resource allocation problem in the SCMA system in the single-cell scenario, this paper aims to maximize the system throughput and ensure the minimum threshold rate of all users, and model it as an alliance game to solve it. Due to the problems of high complexity and slow convergence in traditional alliance game algorithms, this paper proposes to establish a priority sequence to guide the initialization and formation process of alliances, thereby reducing the number of algorithm iterations and reducing system complexity. Finally, the feasibility of the algorithm is verified by simulation.

Key words: 5G; SCMA; D2D; resource allocation; game theory

0 引言

通信网络对容量需求的不断增长导致可用的无线资源日益匮乏, 为了缓解通信资源紧缺的问题, 5G 通信系统引入了终端直连(D2D)通信技术。D2D 通信是蜂窝网络中彼此邻近的设备不经过基站转发, 直接进行信息传输的通信方式^[1]。通过允许其用户复用蜂窝资源进行数据传输, D2D 通信能有效提高频谱利用率, 增大系统容量, 降低基站负载, 但代价是严重的同频干扰。为了解决这一问题, 通信资源分配至关重要, 合理的资源分配不仅能减小用户速率损失, 还能有效提升系统容量、效率及用户满意度。文献[2-3]从保证用户 QOS 需求的角

度出发进行了资源分配算法的设计; 文献[4]以保证用户公平性为目标提出了有效的资源分配算法; 文献[5-6]通过将资源分配问题进行分析转换, 利用遗传退火、鸽群等优化算法得出了可行的资源分配方案。

目前大部分对 D2D 通信资源分配的研究都是基于正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)系统, 由于 OFDMA 的正交性限制, 通信系统容量仍无法满足需求。因此, 除了资源分配, 多址接入技术的改进也十分关键, 于是针对 5G 网络多种非正交接入技术相继提出, 基于这些新型多址技术的 D2D 网络也成为当前研究的热点^[7-8]。在诸多非正交多址技术中, SCMA 通过使用不同的星座图区分占用相同频谱的用户, 能提供更多正交资源, 因此 SCMA 更适用于

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801516)

D2D 和蜂窝混合网络^[9]。本文针对 SCMA 系统下 D2D 用户的资源分配问题, 以最大化系统吞吐量为目标, 提出了一种改进的基于联盟博弈的资源分配算法, 通过建立复用优先级指导联盟形成及切换过程, 在保证用户通信质量的同时减少了无效的联盟切换, 降低了算法复杂度。

1 系统模型和问题建模

1.1 系统模型

如图 1 所示, $\{\text{CU}_1, \text{CU}_2, \dots, \text{CU}_n\}$ 表示蜂窝用户, $\{\text{DU}_1, \text{DU}_2, \dots, \text{DU}_n\}$ 表示 D2D 用户, 在蜂窝下行网络中采用 SCMA 多址接入 (SCMA 接入机制中, 一个时频资源划分为 J 个 SCMA 层, J 个 SCMA 层通过 J 个码本复用 h 个正交的 OFDMA tones^[10]), D2D 用户复用蜂窝用户 SCMA 码本进行通信, 且允许多个 D2D 用户对复用同一蜂窝用户码本资源。假设系统中包含 D 个蜂窝用户 $\Omega_c = \{1, \dots, D\}$, Q 个 D2D 对 $\Omega_d = \{D+1, \dots, D+Q\}$, M 层 SCMA 码本资源 ($M=D$)。

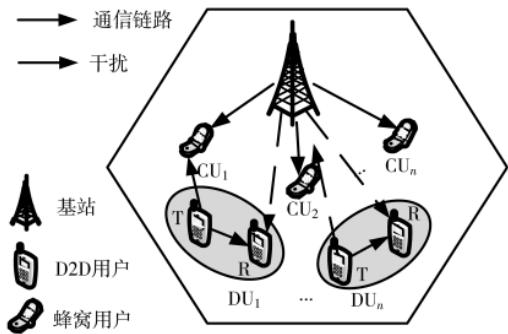


图 1 SCMA 系统中 D2D 通信模型

假设 h 个 OFDM tones 上基站到蜂窝用户 U_0 的信道增益为 $K_{u_0, m}^{\text{cu}} = \{k_{1, u_0}^m, k_{2, u_0}^m, \dots, k_{h, u_0}^m\}$, 基站到 D2D 对 U_0 的信道增益为 $K_{u_0, m}^{\text{cd}} = \{k_{1, u_0}^m, k_{2, u_0}^m, \dots, k_{h, u_0}^m\}$, D2D 对 U_0 发射端 T 到接收端 R 的信道增益为 $K_{u_0, m}^{\text{d2d}} = \{k_{1, u_0}^m, k_{2, u_0}^m, \dots, k_{h, u_0}^m\}$, D2D 对 U 的发射端 T 到蜂窝用户 U_0 的信道增益为 $K_{uu_0, m}^{\text{dc}} = \{k_{1, uu_0}^m, k_{2, uu_0}^m, \dots, k_{h, uu_0}^m\}$, D2D 对 U 发射端到 D2D 对 U_0 接收端的信道增益为 $K_{uu_0, m}^{\text{dd}} = \{k_{1, uu_0}^m, k_{2, uu_0}^m, \dots, k_{h, uu_0}^m\}$ 。

于是蜂窝用户或 D2D 对 U_0 接收信号的矢量模型为:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{u_0, m} = & \text{diag}(K_{u_0, m}^{\text{cu}}) \sqrt{P_{u_0, m} / J_{u_0, m}} \sum_{j=1}^{J_{u_0, m}} X_{ju_0}^m + \\ & \text{diag}(K_{u_0, m}^{\text{cu}}) \sum_{u \in N_m \cap \Omega \setminus \{u_0\}} \sqrt{P_{u, m} / J_{u, m}} \sum_{j=1}^{J_{u, m}} X_{ju}^m + \\ & \text{diag}(K_{uu_0, m}^{\text{dc}}) \sum_{u \in N_m \cap \Omega \setminus \{u_0\}} \sqrt{P_{u, m} / J_{u, m}} \sum_{j=1}^{J_{u, m}} X_{ju}^m + \mathbf{n}_{u_0, m} \quad (1) \end{aligned}$$

复用蜂窝用户 SCMA 码本的 D2D 对 u_0 接收信号的

矢量模型为:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{u_0, m} = & \text{diag}(K_{u_0, m}^{\text{d2d}}) \sqrt{P_{u_0, m} / J_{u_0, m}} \sum_{j=1}^{J_{u_0, m}} X_{ju_0}^m + \\ & \text{diag}(K_{u_0, m}^{\text{cd}}) \sum_{u \in N_m \cap \Omega \setminus \{u_0\}} \sqrt{P_{u, m} / J_{u, m}} \sum_{j=1}^{J_{u, m}} X_{ju}^m + \\ & \text{diag}(K_{uu_0, m}^{\text{dc}}) \sum_{u \in N_m \cap \Omega \setminus \{u_0\}} \sqrt{P_{u, m} / J_{u, m}} \sum_{j=1}^{J_{u, m}} X_{ju}^m + \mathbf{n}_{u_0, m} \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $P_{u, m}$ 为用户 u 的发射功率, $P_{u_0, m}$ 为用户 u_0 的发射功率, $J_{u, m}$ 为用户 u 的占用的 SCMA 层, $J_{u_0, m}$ 为用户 u_0 的占用的 SCMA 层, X_{ju}^m 为用户 u 的第 j 个 SCMA 码字, $X_{ju_0}^m$ 为用户 u_0 的第 j 个 SCMA 码字, $\mathbf{n}_{u_0, m}$ 为环境噪声矢量, $P_m = \sum_{u=1}^{N_m} P_{u, m}$ 为系统总发射功率。

1.2 问题建模

设蜂窝用户或 D2D 对只占用一层 SCMA 资源, 且采用理想的 MPA 接收机, 即只有同一码本被多个用户复用时才会产生干扰。复用同一码本的蜂窝用户和 D2D 对所受干扰分别为:

$$I_{u, m}^{\text{cu}} = \sigma_{u, m}^2 + \sum_{u'=D+1}^{D+Q} \sum_{m=1}^M a_{u', m} P_{u', m} \left| k_{u' u, m}^{\text{dc}} \right|^2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{u, m}^{\text{d2d}} = & \sigma_{u, m}^2 + \sum_{u'=1, u' \neq u}^D \sum_{m=1}^M a_{u', m} P_{u', m} \left| k_{u' u, m}^{\text{cd}} \right|^2 + \\ & \sum_{u'=D+1, u' \neq u}^{D+Q} \sum_{m=1}^M a_{u', m} P_{u', m} \left| k_{u' u, m}^{\text{dd}} \right|^2 \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $a_{u, m}=1$ 时, 表示用户 u 占用 SCMA 层 m 上的码本资源, 否则 $a_{u, m}=0$ 且 $\sum_{m=1}^M a_{u, m}=1, \forall u$ 即一个用户只能占用一个 SCMA 层资源; $P_{u, m}=1$, 表示用户 u 的发射功率满足 m 层总功率限制 $\sum_{m=1}^M a_{u, m} P_{u, m} \leq P_m^{\max}$ 。

信干噪比分别为:

$$\text{SINR}_{u, m}^{\text{cu}} = \frac{P_{u, m} \left| k_{u, m}^{\text{cu}} \right|^2}{I_{u, m}^{\text{cu}}} \quad (5)$$

$$\text{SINR}_{u, m}^{\text{d2d}} = \frac{P_{u, m} \left| k_{u, m}^{\text{d2d}} \right|^2}{I_{u, m}^{\text{d2d}}} \quad (6)$$

因此, 蜂窝与 D2D 异构网络中系统总吞吐量为:

$$\begin{aligned} C = & C_{u, m}^{\text{cu}} + C_{u, m}^{\text{d2d}} \\ = & \text{Blog}_2(1 + \lambda_{u, m} \text{SINR}_{u, m}^{\text{cu}}) + \text{Blog}_2(1 + \lambda_{u, m} \text{SINR}_{u, m}^{\text{d2d}}) \quad (7) \end{aligned}$$

最大化系统吞吐量的目标函数及限制条件为:

$$\begin{aligned} \max \{ & \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^D C_{u, m}^{\text{cu}} a_{u, m} + \sum_{m=1}^M \sum_{u=D+1}^{D+Q} C_{u, m}^{\text{d2d}} a_{u, m} \} \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \sum_{m=1}^M a_{u, m} C_{u, m}^{\text{cu}} \geq R_u^{\min}, \forall u \in \Omega_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C2: \sum_{m=1}^M a_{u,m} C_{u,m}^{\text{d2d}} &\geq R_u^{\min}, \forall u \in \Omega_d \\
 C3: \sum_{u=1}^D a_{u,m} P_{u,m} &\leq P_u^{\max}, \forall m \\
 C4: \sum_{u=1}^D a_{u,m} P_{u,m} &\leq P_u^{\max}, \forall u \in \Omega_d \\
 C5: \sum_{m=1}^M a_{u,m} &= 1, \forall u \\
 C6: a_{u,m} &= \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

其中, C1 和 C2 限制了最低用户速率, C3 和 C4 限制了 D2D 对和 SCMA 层的最大发射功率, C5 和 C6 限制了每个蜂窝用户或 D2D 对只能占用一个 SCMA 码本资源。

2 基于联盟博弈的资源分配算法

从目标函数可以看出, 上述资源分配问题是具有非线性约束的 NP-hard 优化问题, 且最大化系统吞吐量的关键在于找到最合理的资源分配方案。为了降低问题的复杂度, 本文将码本分配问题转化为联盟博弈问题考虑求其较好的次优解。在博弈模型中, 每个 SCMA 层形成一个联盟, 一个联盟中可以有多个 D2D 对, 但每个 D2D 对只能加入一个联盟, 同一联盟中的多个用户复用对应 SCMA 层的码本资源。

2.1 联盟博弈模型

假设网络中的 D 个蜂窝用户已经完成了 SCMA 码本分配, 接下来只需进行 D2D 对的码本分配。构建联盟博弈模型 $G=(\Omega, v, S)$, 其中, $\Omega=\Omega_c \cup \Omega_d$ 表示博弈参与者, 即所有蜂窝用户和 D2D 对的集合; v 表示联盟效用; S 表示联盟结构, 即 M 个 SCMA 层共同构成的联盟集合 $S=\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_M\}$ 。假设 D2D 用户发射功率为允许的最大发射功率, 为了达到最大化系统吞吐量, 根据式(8)可将每个联盟 $S_m \in S$ 中的效用设定为:

$$v(S_m) = \sum_{u \in S_m \cap \Omega_c} C_{u,m}^{\text{cu}} + \sum_{u \in S_m \cap \Omega_d} C_{u,m}^{\text{d2d}} \tag{9}$$

将联盟效用平均分配给联盟内的所有用户, 则每个用户 u 的效用表示为:

$$v_m(S_m) = \frac{v(S_m)}{|S_m|}, \forall u \in S_m \tag{10}$$

其中, $|S_m|$ 为联盟 S_m 中蜂窝用户和 D2D 对数量之和。

在博弈过程中, 参与者根据某种联盟切换准则选择加入或退出联盟。假设对 D2D 对 u , 若 u 从联盟 S_m 切换到 $S_{m'}$ 时, 其效用增加 $v_m(S_m) > v_{m'}(S_{m'})$, 则此时 u 退出联盟 m 加入联盟 m' 。由此可得到联盟切换准则为:

$$S_m \triangleright S_{m'} \Leftrightarrow v_m(S_m) > v_{m'}(S_{m'}) \tag{11}$$

该准则保证了仅当联盟变更策略同时满足提升自身及联盟内其他用户效用时才进切换。根据该准则, 所有博弈参与者不断寻找有效的联盟变更策略, 直到没有可提升效用的选择, 即联盟结构达到纳什稳定(NASH)。

2.2 联盟博弈算法

由于传统的联盟博弈算法中, 联盟初始化及形成过程均以随机方式进行, 导致算法所需的迭代次数较多、复杂度较高, 因此本文提出通过构建复用优先级, 指导 D2D 对进行联盟选择, 从而减少迭代次数。具体构建过程如下。

首先, 计算 D2D 对 u_i 和蜂窝用户 C_m 间的干扰, 并根据大小进行排序, 由此可得到两个干扰序列 $ID_m=\{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_D\}$ 和 $IC_m=\{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_D\}$, 在 ID_m 中排列越靠前的蜂窝用户对 u_i 的干扰越小, 在 IC_m 中排列越靠前的蜂窝用户受到 u_i 的干扰越小; 其次, 由 u_i 的两个干扰序列, 经指数运算得到每个 C_m 对应的复用系数。例如, C_m 在序列 ID_m 中位于第 p 个, 在 IC_m 中位于第 q 个, 则 C_m 对于 u_i 的优先级为 $r_i=3^p \cdot 2^q$; 最后根据所有 C_m 的复用系数从小到大进行排序, 其对应的 S_m 顺序即为 u_i 的复用优先级 R_i 。

综上所述, 联盟博弈算法的主要过程如下:

(1) 构建复用优先级。根据上文中描述的步骤, 得到复用优先级序列 $R=\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_D\}$ 。

(2) 联盟初始化。初始化联盟为单联盟结构, 即每个联盟中均只包含一个成员。参与者 u_i 按照各自 R_i 中的优先顺序, 选择第一个能满足自身最低门限速率的联盟加入, 若多个 u_i 选择同一 S_m , 则比较 S_m 对应的 C_m 关于各 u_i 的复用系数, 系数小的 u_i 加入 S_m , 系数大的继续按优先级顺序进行选择。重复上述过程直到所有 u_i 均加入一个联盟, 形成初始化联盟 S 。

(3) 更新优先级序列。在 R_i 中去掉 u_i 当前所在联盟 S_i , 若 S_i 在 R_i 中排在首位, 则更新 $R_i'=\{S_2, S_3, \dots, S_m\}$, $m=[3D/4]$; 若 S_i 在 R_i 中不是首位, 则更新 $R_i'=\{S_i, S_{i+1}, \dots, S_m\}$, $m=[D/2]$ 。

(4) 联盟形成。所有参与者按 R_i' 中的顺序判断是否进行联盟变更, 重复直到没有可行的切换策略。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

在 SCMA 系统中的单小区场景下仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	数值
小区半径/m	500
噪声功率/(dBm/Hz)	-174
路径损耗	$L=128.1+37.6\log_{10}(D)$ (其中, D 为信号传输距离)
SCMA 码本层数	6
SCMA 码本大小	4 OFDMA tones
SCMA 码字维度	4
基站发射功率/dBm	46
D2D 用户发射功率/dBm	23
D2D 用户最大距离/m	30

3.2 仿真结果

图 2 为一次仿真的用户分布图。图中包含 5 个蜂窝用户和 10 个 D2D 对, 在横纵坐标均为 $[-500, 500]$ (单位: m) 的坐标轴上有一个边长为 250 的正六边形小区, 基站在小区的中心位置, 蜂窝及 D2D 用户在小区中随机分布。经过联盟博弈算法最终得到的联盟结构为: $\{C_4, D_1\}, \{C_1, D_2, D_4\}, \{C_3, D_7, D_9\}, \{C_2, D_3, D_6, D_8\}$ 。从结果可以看出, 联盟结构与用户所处的物理位置有一定关系, 由于距离近的用户间干扰大, 故 D2D 用户更倾向于复用距离较远的蜂窝用户资源。

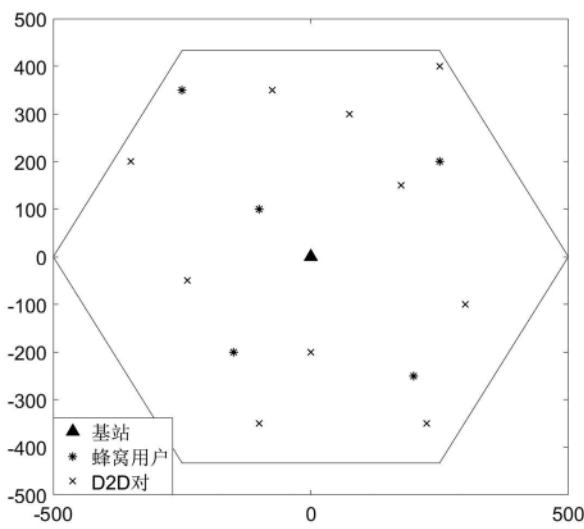


图 2 仿真场景

首先设置仿真参数完全相同, 对比 OFDMA 和 SCMA 两种接入方式下的通信系统性能, 如图 3 所示。可以看出, 随着 D2D 用户数的增加, 两种系统的通信速率都得到了明显提升, 由此说明引入 D2D 通信确实能有效

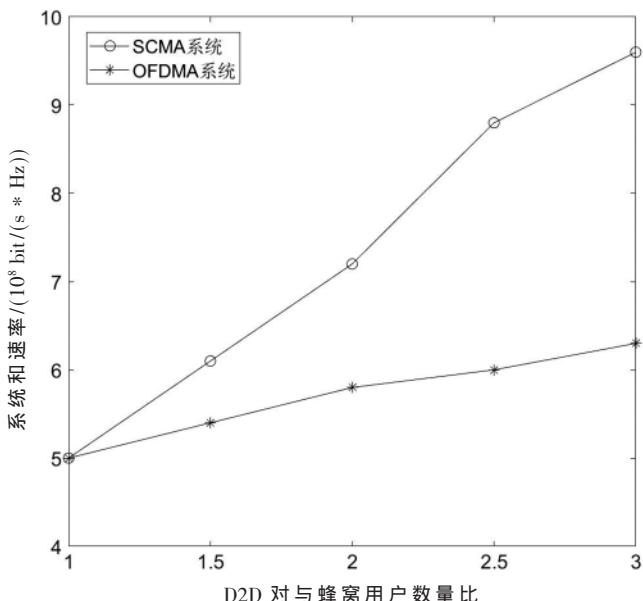


图 3 OFDMA 系统和 SCMA 系统性能对比

增大通信系统容量。同时当 D2D 对与蜂窝用户数量不断增加时二者差距逐渐加大, 由此可见在用户密集的场景中 SCMA 对系统容量的提升更为显著。此外, OFDMA 下的曲线有明显收敛趋势, 而 SCMA 下并不明显, 也说明了 SCMA 在提升系统和速率上有更大上升空间。

其次将本文所提算法与传统联盟博弈算法^[11]、贪婪算法^[12]和随机选择算法进行对比。从图 4 可以看出, 随着 D2D 用户的增加, 传统联盟博弈算法达到纳什稳定所需联盟切换次数的越来越大, 不仅减慢了算法收敛速度, 还增加了算法复杂度。而本文算法通过优先级序列的指导, 有效减少了算法中的无效切换次数, 降低了算法复杂度, 且随 D2D 用户的增加优势愈发明显。

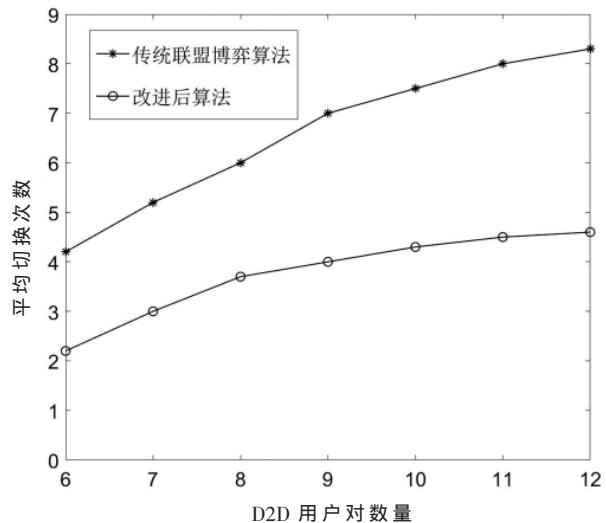


图 4 联盟形成过程中切换次数对比

如图 5 所示, 4 种算法下的系统和速率均随着 D2D 用户数的增加而增大。在比值相同时, 两种联盟博弈算法的系统和速率与贪婪算法差距不大, 但随比值上升差

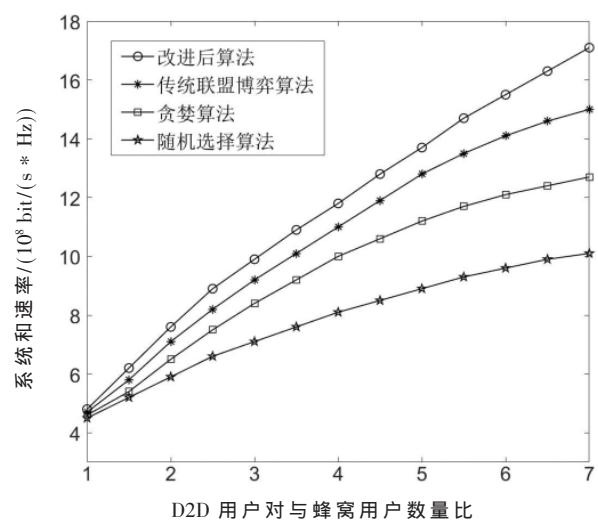


图 5 不同算法性能对比

发现,静态模式下实时 PPP 定位精度可达厘米级,动态模式下可达到分米级,满足了实际工程化应用。不过在实验中也发现静态 PPP 收敛时间过长以及动态 PPP 会因 SSR 改正数异常问题定位出现偏离,后期会优化 PPP 算法,同时进行不同分析中心 SSR 改正数历元间滤波算法研究,增加组合 SSR 滤波模块,减少挂载点切换时对动态 PPP 所带来的影响。

参考文献

- [1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(4): 5005–5017.
- [2] 袁正午, 何格格. 一种高精度的 GPS-RTK 定位技术设计与实现[J]. 电子技术应用, 2018, 44(6): 63–67.
- [3] 张翠英, 赵兴旺. GNSS 观测值统一表达及组合 PPP 解算性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(1): 10–14, 18.
- [4] CAISSY M, AGROTIS L, WEBER G, et al. The international

(上接第 54 页)

距逐渐拉开,这是由于贪婪算法没有考虑 D2D 对受到的干扰,故用户数量增加时同频干扰的影响会更严重。除此之外改进后算法在系统和速率上也有一定的提升,充分说明了优先级序列在帮助联盟博弈提高系统性能上的有效性和可行性。

4 结论

在 SCMA 多址下,由于蜂窝用户和 D2D 对共享相同频谱资源,二者间存在同频干扰,本文要解决的就是通过合理的 SCMA 码本分配,在控制干扰的同时有效提高系统和速率的问题。为便于计算将资源分配问题转化为联盟博弈进行求解,在单小区蜂窝下行链路场景中,建立联盟博弈模型和目标函数。而后针对传统联盟博弈算法中存在的收敛速度慢、算法复杂度高等问题,提出利用优先级序列指导联盟初始化和形成过程,从而在保证用户通信质量的同时降低了算法复杂度,提升了系统和速率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李少华, 覃锡忠, 贾振红, 等. 基于 QoS 的 D2D 能效优化[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(4): 1188–1193.
- [3] 邬春明, 尚恒蕾. 基于 QoS 的 D2D 资源分配算法[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(2): 89–95.
- [4] 孙晨, 张波. 异构蜂窝网络中功率和资源分配博弈算法研究[J]. 计算机工程, 2021, 47(10): 160–165, 173.
- [5] 汪汉新, 李鹏威. 基于遗传退火的密集 D2D 网络资源分配算法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2020, 39(1):

GNSS real-time service[J]. GPS World, 2012, 23(6): 52–58.

- [5] 徐泽远, 李淑慧, 谢名强, 等. SSR 改正的 GLONASS/GPS 实时 PPP 性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(3): 246–251.
- [6] TAKASU T. RTKLIB: an open source program package for GNSS positioning[EB/OL].[2021-03-16]. <http://www.rtklib.com/>.
- [7] WEBER G, MERVART L, STUERZE A, et al. BKG NTRIP Client(BNC) Version 2.12[M]. Frankfurt: BKG, 2016: 1–161.
- [8] ZHOU F, DONG D N, LI W W, et al. GAMP: an open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 33.
- [9] DONG X, CHEN W. Research and implementation of dual-frequency precise point position based on U-blox F9P[C]// 2020 5th International Conference on Computer and Com-

(下转第 64 页)

79–84.

- [6] 张达敏, 张绘娟, 闫威, 等. 异构网络中基于鸽群优化算法的 D2D 资源分配机制[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2959–2967.
- [7] 徐勇军, 刘子腱, 李国权, 等. 基于 NOMA 的无线携能 D2D 通信鲁棒能效优化算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1289–1297.
- [8] SULTANA A, WOUNGANG I, ANPALAGAN A, et al. Efficient resource allocation in SCMA–enabled Device–to–Device communication for 5G networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69: 5343–5354.
- [9] CHUNG K. NOMA for correlated information sources in 5G systems[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 25: 422–426.
- [10] ZHANG M, LI D, ZHANG J, et al. Resource allocation for SCMA based D2D underlaid cellular system[C]// 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology(ICET). Chengdu, 2019: 56–60.
- [11] Yu Xiang, Zhang Haibo, Ke Wentao. Research on resource allocation for enhancing access rate in dense D2D networks[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(3): 96–99, 103.
- [12] EDMONDS J. Matroids and the greedy algorithm[J]. Mathematical Programming, 1971, 1(1): 127–136.

(收稿日期: 2021-05-07)

作者简介:

陈雨洁(1997-), 通信作者, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: D2D 通信资源分配, E-mail: 929897085@qq.com。

马彩虹(1978-), 硕士, 副教授, 主要研究方向: 网络融合。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所