

基于非均衡求解的D2D多复用通信资源块分配算法研究

钱志鸿 胡良帅 田春生 王雪*

(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

摘要: 针对小区内D2D多复用的通信资源块分配问题, 该文以一个D2D用户分别复用2个和3个蜂窝为基础, 提出基于非均衡求解的D2D多复用模式下的资源块分配方案。利用博弈论将资源块划分问题转化为求解被复用蜂窝用户收益联合最大问题。当纳什均衡解不存在时, 分析目标函数特性, 在可行域内求解“最优解”, 保证对不均衡解处理的最优性; 对于均衡解存在的情况, 将其取整后作为资源分配方案依据, 保持其最优性。通过理论分析及仿真实验表明该算法可以提升系统吞吐率, 提高小区通信性能。

关键词: D2D通信; 资源块分配; 小区收益; 博弈论

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2810-07

DOI: 10.11999/JEIT190171

Research on D2D Multi-multiplex Communication Resource Blocks Allocation Algorithm Based on Unbalanced Solution

QIAN Zhihong HU Liangshuai TIAN Chunsheng WANG Xue

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

Abstract: In order to solve the problem of the Device to Device (D2D) multi-multiplex communication resource blocks allocation in a cell, the resource blocks allocation scheme about D2D multi-multiplex mode based on non-equilibrium solution is proposed after analyzing a D2D user to multiplex two and three cells respectively. The problem of resource blocks partitioning is transformed into the problem of solving the joint revenue maximum value of the multiplexed cellular user by using game theory. When the Nash equilibrium solution does not exist, the objective function is analyzed, the "optimal solution" is solved in the feasible domain and the optimality of unbalanced solution processing is guaranteed. When the equilibrium solution exists, it is rounded up and used as the basis of the resource allocation scheme to maintain its optimality. The theoretical analysis and simulation results show that the proposed algorithm enhances significantly the system performance and sum rate.

Key words: Device to Device (D2D) communication; Resource blocks allocation; Community revenue; Game theory

1 引言

蜂窝用户数量的快速增长率与有限的通信资源之间的矛盾日益加剧, 因此合理的资源复用则显得尤为重要。D2D(Device-to-Device)直连技术^[1], 即通信网络中近邻设备之间不需要通过基站而直接完成数据传输^[2], 可以通过复用的方式使频谱资源得

到有效的利用, 减轻基站的工作负荷, 提升频谱利用效率, 增大网络系统的吞吐率, 降低网络时延, 使通信网络能够快速建立, 通信系统实现高效与智能化运行。D2D作为5G及未来通信的关键技术之一^[3-5], 是保证连接、提升资源利用率的重要依托技术, 因此, 如何利用D2D通信技术建立高效、稳定的通信系统是当下的研究重点^[6,7]。

在D2D的通信模式下, 蜂窝用户与D2D用户共享通信资源, 一方面D2D用户通过复用蜂窝用户的资源可以获取额外的吞吐量, 提高有限资源的利用率, 从而提升小区通信性能, 其复用增益与复用资源数量密切相关; 另一方面, D2D用户与蜂窝用户复用同一资源块会对原蜂窝用户的通信造成干扰, 降低蜂窝用户的吞吐量, 同样D2D用户对被复用蜂窝用户的干扰也与通过复用获取的资源数量有关,

收稿日期: 2019-03-21; 改回日期: 2019-06-13; 网络出版: 2019-06-24

*通信作者: 王雪 jluwangxue@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), 吉林大学研究生创新基金(101832018C022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771219), The Fundamental Research Funds of Jilin University (SXGJQY2017-9, 2017TD-19), The Graduate Innovation Fund of Jilin University (101832018C022)

因此如何合理地将通信资源块分配给D2D用户是需要解决的关键性问题。在现有的D2D通信研究中，复用模式中D2D的资源分配大都着眼于1个D2D用户复用1个蜂窝用户，且大部分的研究都立足于功率控制，以此减小用户间的同频干扰，但鲜有对小区通信资源块分配的研究。冯大权^[8]研究D2D用户1对1复用蜂窝用户时，依据用户的QoS需求和信噪比限制，提出最小距离接入准则，进而筛选适合接入D2D通信的用户，分别研究了完美信道下和非完美信道下的功率控制以及信道选择实现通信资源的分配，但并未研究多复用D2D用户以及被复用用户间的资源块分配问题。代海波等人^[9]利用博弈论学习方法进行异构小区建模及功率控制，研究多个D2D用户协作共同复用蜂窝通信资源，证明大规模天线其博弈势函数的下界是紧的，并设计低复杂度快收敛的功率控制算法。此外，文献^[10]利用Stackelberg博弈模型，提出了一种不需要信息交换的完全分布式解决方案，以在确保蜂窝用户设备(Cellular User Equipment, CUE)的服务质量(QoS)的同时为D2D用户完成功率分配和信道分配。文献^[9,10]的研究都着眼于功率控制问题，对于复用资源块方面的研究只研究了全复用的情况，没有对资源块的复用方案进行具体分析。HUANG等人^[11]利用博弈论为D2D在小区间通信时建立系统模型，考虑邻近小区基站的收益，并根据邻近小区基站的效用函数求出最佳响应曲线，利用最佳响应曲线分析均衡解是否存在，然后使用迭代算法将解进行分析处理，实现小区间的D2D通信资源块分配，但其研究中仅考虑每个小区存在1对D2D用户和蜂窝用户，没有对纳什均衡解是否存在的情况进行区别处理，在对解进行迭代时没有分析迭代是否能保持“较优性”，当迭代后的资源分配点仍属于不可行解时，直接赋值没有考虑系统收益的最优性。针对非均衡解处理的问题，目前大多研究都使用迭代算法^[11-13]，但迭代算法不能确保迭代过程的优越性。

针对以上分析，为提高小区内D2D通信系统的整体通信性能，本文提出一种基于非均衡求解的D2D通信资源分配算法，主要贡献如下：

(1) 提出1对D2D用户复用的通信资源块可以由多个蜂窝用户提供的通信方式，建立普适性1对 n 复用通信模型，以1对D2D用户复用2个和3个蜂窝用户为例分析新模型下通信系统的特性。

(2) 利用博弈论方法解决系统的最优解问题，对被复用蜂窝用户的最佳响应曲线交点情况进行几何学分析，依据效用函数最大相似性原则为纳什均

衡不存在时设计资源块分配方案，为多复用模式下的D2D通信更合理地设计资源分配算法。

2 干扰模型

假设在单小区内有多个用户和1个基站，如图1所示，其中包括 M 个蜂窝用户(Cellular User, CU)和 N 对D2D用户。D2D用户对可以从多个CU处获得通信所需资源块，以下为方便分析，先以D2D用户对可以从2个CU处获得通信所需资源块为例进行阐述，后续会进一步对D2D复用多个CU资源的情况进行分析。小区内用户通信模式主要分为两种：蜂窝模式，如图1中的 CU_3 和 CU_k ，其通信过程不受到其他用户的影响；D2D复用模式，如图1中的Pair1和Pair2，在通信过程中D2D用户会分别受到 CU_1 、 CU_2 和 CU_i 和 CU_j 的干扰，同时，被复用的 CU_1 、 CU_2 和 CU_i 、 CU_j 在通信链路中也会受到对应匹配D2D对的干扰。为明确本文干扰的组成部分，将其定义为：D2D对 m 接收端受到所复用CU的干扰 $\sum_{i \in S} (G_{i,D_{R_{xm}}} P_i)$ ，其中 S 为被D2D用户对 m 复用的CU集合， $G_{i,D_{R_{xm}}}$ 为被复用 CU_i 到D2D对 m 接收端的路径增益， P_i 为被复用 CU_i 的发射功率；被复用CU受到的干扰 $G_{D_{Txm},BS} P_{D_{Txm}}$ ，其中 $G_{D_{Txm},BS}$ 为D2D对 m 发射端到基站的路径增益， $P_{D_{Txm}}$ 为D2D对 m 发射端的发射功率。

因此，以 CU_1 、 CU_2 和Pair1构成的复用系统为例，CU和D2D用户的吞吐量分别为

$$R_1 = B_1 \log_2 \left(1 + \frac{G_{1,BS} P_1}{N_0 + G_{D_{Tx1},BS} P_{D_{Tx1}}} \right) \quad (1)$$

$$R_2 = B_2 \log_2 \left(1 + \frac{G_{2,BS} P_2}{N_0 + G_{D_{Tx1},BS} P_{D_{Tx1}}} \right) \quad (2)$$

$$R_{D2D} = (B_\alpha + B_\beta) \cdot \log_2 \left(1 + \frac{G_{D2D} P_{D_{Tx1}}}{N_0 + G_{1,D_{Rx1}} P_1 + G_{2,D_{Rx1}} P_2} \right) \quad (3)$$

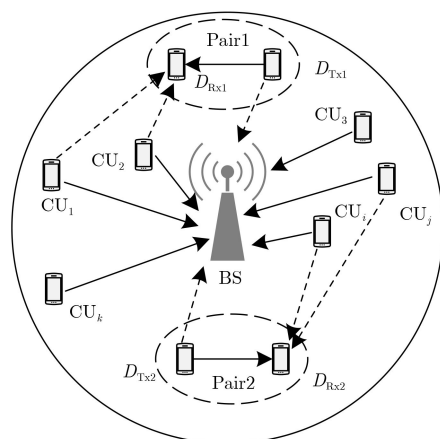


图1 小区干扰模型图

其中, B_1 和 B_2 分别为 CU_1 , CU_2 的通信资源块, B_α 和 B_β 分别为从 CU_1 和 CU_2 处所得的资源块, $G_{i,j}$ 为通信端 i 到接收端 j 的路径增益, G_{D2D} 为D2D用户对间的路径增益, N_0 为加性高斯白噪声功率, P_i 为通信端 i 的发射功率。复用系统的吞吐量是由被复用CU的吞吐量和D2D用户的吞吐量的总和构成, 同时D2D用户的发射功率 $P_{D_{Txn}}$ 与所获得的资源块 B_α 和 B_β 有一个权衡(反比)关系^[1]

$$P_{D_{Txn}} \propto \frac{1}{B_\alpha + B_\beta} \quad (4)$$

因此复用系统的吞吐量与资源块的分配情况有着密切关系。此外, 系统对资源块的分配会消耗自身的资源而带来负收益, 为了统筹分析CU的收益, 可以把复用过程看作一个博弈过程, 将被复用的CU作为参赛者, 参赛者通过博弈为D2D用户分配资源块。

3 静态博弈模型

在D2D复用系统中, CU将通信资源复用给D2D用户, 会提升D2D用户的吞吐量, 若将此处的收益归源于CU, 则CU与D2D用户共享资源提升了CU的价值。一方面, 若 CU_1 增大 B_α 收获更大收益, 则 CU_2 也希望增大 B_β , 造成D2D用户获取大量的通信资源块, 使复用资源块单价升高^[14], 增大CU的复用开支, 反而减小 CU_1 与 CU_2 的价值。另一方面, 若 CU_1 减小 B_α , 由式(4)知, B_α 减小会使D2D发射功率需求变大, 增加对 CU_2 的通信干扰, 减小 CU_2 的价值, 反之对于 CU_2 而言同理, 因而使双方都无法达到最佳通信状态。为了解决这一问题, 这里引入静态博弈的思想进行资源分配, 将 CU_1 和 CU_2 作为博弈双方, 博弈双方的效用函数 U_i 有3部

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial B_\alpha} &= \frac{\partial \left\{ aB_1 \log_2 \left(1 + \frac{G_{1,BS}P_1B_\alpha}{z_1} \right) + bB_\alpha - [x + y(B_\alpha + B_\beta)^\tau]B_\alpha \right\}}{\partial B_\alpha} \\ &= \frac{aB_1 G_{1,BS}P_1}{\ln 2} \cdot \frac{1}{z_1 + G_{1,BS}P_1B_\alpha} - y(2B_\alpha + B_\beta) + b - x \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

得

$$B_\beta = \frac{aB_1 G_{1,BS}P_1}{y \ln 2} \cdot \frac{1}{z_1 + G_{1,BS}P_1B_\alpha} - 2B_\alpha + \frac{b-x}{y} \quad (12)$$

同理可得 CU_2 的最佳响应曲线, 两条最佳响应曲线的交点即为解

$$B_\alpha = \frac{aB_2 G_{2,BS}P_2}{y \ln 2} \cdot \frac{1}{z_2 + G_{2,BS}P_2B_\beta} - 2B_\beta + \frac{b-x}{y} \quad (13)$$

分构成: CU自身的吞吐量所具备的价值、被D2D复用的资源块带来的收益和分配复用资源带来的开支。因此, 建立博弈双方的效用函数为

$$U_1 = aR_1 + bB_\alpha - cB_\alpha \quad (5)$$

$$U_2 = aR_2 + bB_\beta - cB_\beta \quad (6)$$

其中, a 为CU的吞吐量的权重, b 为复用资源块带来收益的权重, c 为资源块的价格, 代价权重 c 定义为^[14]

$$c = x + y(B_\alpha + B_\beta)^\tau, \tau \geq 1 \quad (7)$$

其中, y 为非负值, $\tau \geq 1$ 是为了保证价格函数的非凸性, 将式(7)代入式(5)和式(6)可得

$$U_1 = aR_1 + bB_\alpha - [x + y(B_\alpha + B_\beta)^\tau]B_\alpha \quad (8)$$

$$U_2 = aR_2 + bB_\beta - [x + y(B_\alpha + B_\beta)^\tau]B_\beta \quad (9)$$

不失一般性, 可由式(4)将式(1)和式(2)的 $(N_0 + G_{D_{Tx1},BS}P_{D_{Tx1}})$ 和 $(N_0 + G_{D_{Tx2},BS}P_{D_{Tx2}})$ 分别等价于 z_1/B_α 和 z_2/B_β (z_1 和 z_2 为非负常数)^[11], 然后代入式(8)和式(9), 可得被复用CU的效用函数, 因此资源块分配问题转化为效用函数 U_i 联合求解最大值的问题。即

$$\left. \begin{aligned} &\text{Max } U_1, U_2 \\ &\text{s.t. } 0 < B_\alpha < B_1, 0 < B_\beta < B_2 \\ &B_{\min} \leq B_\alpha + B_\beta \leq B_{\max} \\ &a, b, x, y > 0 \\ &z_1, z_2 \geq 0 \\ &\tau \geq 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, B_{\min} 是D2D实现传输所需的最低资源块大小, B_{\max} 为复用系统可为D2D分配的最大资源块数目。为联合求解 U_i 最大值, 可对 U_i 求导, 得到 U_i 取到极值时 B_α 和 B_β 的关系式, 即各自的最佳响应曲线, 同时保证价格函数的非凸性, 取 $\tau = 1$ 代入可得

为方便进行资源方案设计, 引出定理1。

定理1 若 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 为最佳响应曲线 $dU_1/dB_\alpha = 0$ 和 $dU_2/dB_\beta = 0$ 在可行域外的交点, 则在可行域内唯一存在一点, 使效用函数 U_1 和 U_2 与原交点的值保持最大相似度, 达到可行域内的最大值, 且其为 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 到邻近可行域边界的垂足。

证明 求 U_1 对 B_α 的2阶偏导得

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 U_1}{\partial B_\alpha^2} &= \frac{\partial \left\{ \frac{aB_1 G_{1,BS} P_1}{\ln 2} \cdot \frac{1}{z_1 + G_{1,BS} P_1 B_\alpha} - y(2B_\alpha + B_\beta) + b - x \right\}}{\partial B_\alpha} \\ &= -\frac{aB_1 G_{1,BS} P_1}{\ln 2} \cdot \frac{G_{1,BS} P_1}{(z_1 + G_{1,BS} P_1 B_\alpha)^2} - 2y\end{aligned}\quad (14)$$

由于 y 为非负值，所以 $\frac{\partial^2 U_1}{\partial B_\alpha^2} < 0$ ，即 $\frac{\partial U_1}{\partial B_\alpha}$ 单调递减，同理可得 $\frac{\partial U_2}{\partial B_\beta}$ 单调递减。

在式(12)中，当 $B_\alpha = 0$ 时(即 CU_1 的最佳响应曲线在 B_β 轴的截距)，

$$B_{\beta^1} = \frac{aB_1 G_{1,BS} P_1}{y \ln 2} + \frac{b-x}{y} \quad (15)$$

同理 CU_2 的最佳响应曲线在 B_α 轴的截距为

$$B_{\alpha^2} = \frac{aB_2 G_{2,BS} P_2}{y \ln 2} + \frac{b-x}{y} \quad (16)$$

其中，路径增益 $G_{i,j} \in (0, 1)$ ，假设 CU 的发射功率 P_i 相同，且基于 CU 的公平性原则， $B_1 = B_2$ 。因为 $\frac{\partial U_1}{\partial B_\alpha}$ 单调递减，所以 $B_{\alpha^1} < B_{\beta^1} \approx B_{\alpha^2}$ ，同理可得

$B_{\beta^2} < B_{\alpha^2} \approx B_{\beta^1}$ ，同时 B_β 与 B_α 的函数具有连续性，故两条最佳响应曲线在第1象限内有交点。交点示意图如图2所示，由于 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 使 U_1 和 U_2 同时达到唯一极大值，则 U_i 随着 $(B_{\alpha 0} + \Delta_\alpha, B_{\beta 0} + \Delta_\beta)$ 中 Δ_α (或 Δ_β)模的增加而减少，因此在可行域内使 U_i 取得最大值的点 $(B_{\alpha 1}, B_{\beta 1})$ 为到 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 距离最近的点，即 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 到邻近可行域边界的垂足。证毕

如图2(a)，当最佳响应曲线的交点落在可行域范围内时，其交点 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 即为最优解。当最佳响应曲线的交点落在可行域范围外时，如图2(b)和图2(c)，其交点 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 为不可行解，以下针对这两种情况为系统资源块分配进行分析并设计算法。

4 资源分配算法分析设计

当最佳响应曲线的交点为不可行解时，需要为其在可行域范围内选择合适的点实现资源块的分配。由定理1可知针对图2(b)和图2(c)的情况，使效用函数最大的点应为 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0})$ 对 $B_{\alpha 0} + B_{\beta 0} = B_{\min}$ 和 $B_{\alpha 0} + B_{\beta 0} = B_{\max}$ 的垂足 $(B_{\alpha 1}, B_{\beta 1})$ 。当交点位于可行域下方时

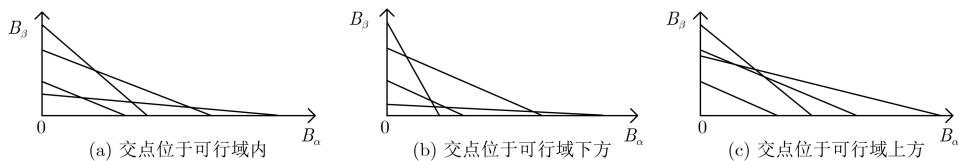


图2 被复用 CU 最佳响应曲线交点分布情况示意图

$$\left. \begin{aligned} B_{\beta 1} - B_{\alpha 1} - d_1 &= 0 \\ B_{\alpha 1} + B_{\beta 1} &= B_{\min} \\ B_{\beta 0} - B_{\alpha 0} - d_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

得

$$\left. \begin{aligned} B_{\alpha 1} &= \frac{B_{\min} + B_{\alpha 0} - B_{\beta 0}}{2} \\ B_{\beta 1} &= \frac{B_{\min} - B_{\alpha 0} + B_{\beta 0}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中， d_1 为常数，同理当交点位于可行域上方时可得

$$\left. \begin{aligned} B_{\alpha 1} &= \frac{B_{\max} + B_{\alpha 0} - B_{\beta 0}}{2} \\ B_{\beta 1} &= \frac{B_{\max} - B_{\alpha 0} + B_{\beta 0}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

当1对D2D复用3个 CU 时，由定理1分析推广得，3个 CU 的最佳响应函数交点(设坐标为 $(B_{\alpha 0}, B_{\beta 0}, B_{\gamma 0})$)仍落在各坐标轴的正轴范围内。当交点落在可行域范围外时，在可行域内唯一存在一点使 U_i 达到可行域内的最大值，且其为交点到邻近可行域边界的投影。

当交点位于可行域下方时，根据垂直约束条件，可得 $B_{\beta 1}$ 与 $B_{\gamma 1}$ 满足式(20)所示条件

$$\left. \begin{aligned} B_{\beta 1} &= (B_{\alpha 1} - B_{\alpha 0}) + B_{\beta 0} \\ B_{\gamma 1} &= (B_{\alpha 1} - B_{\alpha 0}) + B_{\gamma 0} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

同时投影又满足 $B_{\alpha 1} + B_{\beta 1} + B_{\gamma 1} = B_{\min}$ ，可以解得

$$\left. \begin{aligned} B_{\alpha 1} &= \frac{2B_{\alpha 0} - B_{\beta 0} - B_{\gamma 0} + B_{\min}}{3} \\ B_{\beta 1} &= \frac{2B_{\beta 0} - B_{\alpha 0} - B_{\gamma 0} + B_{\min}}{3} \\ B_{\gamma 1} &= \frac{2B_{\gamma 0} - B_{\alpha 0} - B_{\beta 0} + B_{\min}}{3} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

同理可求得当最佳响应函数交点位于可行域上方时投影坐标为

$$\left. \begin{aligned} B_{\alpha 1} &= \frac{2B_{\alpha 0} - B_{\beta 0} - B_{\gamma 0} + B_{\max}}{3} \\ B_{\beta 1} &= \frac{2B_{\beta 0} - B_{\alpha 0} - B_{\gamma 0} + B_{\max}}{3} \\ B_{\gamma 1} &= \frac{2B_{\gamma 0} - B_{\alpha 0} - B_{\beta 0} + B_{\max}}{3} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中, $(B_{\alpha 1}, B_{\beta 1}, B_{\gamma 1})$ 为可行域内离交点最近的点, 将其取整后可作为资源分配方案的依据。

根据双复用和三复用特性, 设计1个D2D用户复用 n 个CU资源分配策略如表1所示。

表1 多复用资源分配策略

算法1 资源分配策略	
(1)输入:	
$N_0, G_{i,j}, x, y, z_1, z_2, \dots, z_n, t, a, b, B_1, B_2, \dots, B_n, B_{\min}, B_{\max};$	
(2)开始: 计算 $R_1, R_2, \dots, R_n, U_1, U_2, \dots, U_n,$	
$B_{10}, B_{20}, \dots, B_{n0};$	
(3)资源分配	
if $\sum_{i=1}^n B_{i0} < B_{\min}$	
for $i = 1$ to $i = n$	
$B_{i1} = \left[(B_{\min} + (n-1)B_{i0} - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{j0}/n) \right];$	
end for	
if $\sum_{i=1}^n B_{i1} > B_{\max}$	
for $i = 1$ to $i = n$	
$B_{i1} = \left[(B_{\max} + (n-1)B_{i0} - \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{j0}/n) \right]$	
end for	
else	
for $i = 1$ to $i = n$	
$B_{i1} = \lceil B_{i0} + 0.5 \rceil;$	
end for	
end	
(4)输出: $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{in}$	

5 实验仿真及分析

本节在MATLAB环境下对上文提出的D2D资源分配算法进行仿真分析, 对本文所提算法得到的资源分配方案的小区通信性能进行展示, 其仿真参数设置^[11,15]如表2所示。

为了研究多复用模式为小区通信带来的收益情况, 首先将多复用与单复用模式的用户吞吐量进行对比实验, 如图3(a)所示, CU的吞吐量依次提高, 原因是D2D用户多复用可以降低对每个被复用CU的干扰。从图3(a)中可以看出D2D双复用比单复用的吞吐量提升明显, 但复用3个CU时的吞吐量与复用2个时差别不大。这是因为增加复用CU数量

表2 仿真参数表

参数	取值
小区半径	1000 m
D2D对最大通信范围	50 m
小区基站带宽	20 MHz
CU的发射功率	25 dBm
D2D用户的发射功率	0~25 dBm
D2D对数量	10
CU数量	50
B_{\min}	0.06 MHz
B_{\max}	0.8 MHz
N_0	-117 dBm/Hz
$\tau, y, z_1, z_2, \dots, z_n$	1
x	0.02
a, b	0.8
用户间路径损耗	$140 + 40 \lg(d_{ij}[\text{km}])$
基站与用户间路径损耗	$128 + 37.6 \lg(d_{ij}[\text{km}])$
阴影衰落	标准差为8的对数正态分布
多径衰落	均值为1的指数分布
用户噪声系数	9 dB
基站噪声系数	5 dB

会增加复用资源块数目, 但也会减小D2D发射功率, 引入新的干扰源。为进一步研究多复用模式下D2D用户的吞吐量特性, 对1对D2D用户复用3, 4和5个CU的情况进行实验。由图3(b)可知, 当D2D用户复用更多CU时, CU的吞吐量仍会有所提高, 但D2D用户的吞吐量会呈衰减趋势, 上述结论得到验证。因此, 实验表明D2D通信模式下D2D用户从多个CU处获取资源块可以提高CU的吞吐量, 一定程度提高D2D用户的吞吐量, 有效发挥资源块的作用。

为验证本文资源分配算法可以提高小区通信收益, 对被复用CU的效用函数进行实验, 其仿真结果如图4所示, 其对比算法为迭代算法^[11]。首先以1对D2D复用2个CU为例, 分析不同迭代系数下两者的效益函数分布情况, 如图4(a)所示, 然后取迭代系数0.02对多复用时两者效益函数进行对比, 如图4(b)~图4(d)所示。由图4可知, 所提算法可以明显提升复用系统的效用函数, 原因主要有两点: 首先, 对于纳什均衡解存在的用户, 其解为系统最优解, 若仍对纳什均衡解进行迭代则会将其变为非最优解, 迭代后的 U_i 反而会变小, 本文所提算法对纳什均衡的存在与否的情况进行不同的处理, 存在时则将其作为最优资源分配方案的依据。其次, 对于纳什均衡解不存在的用户, 迭代算法对不可行解一

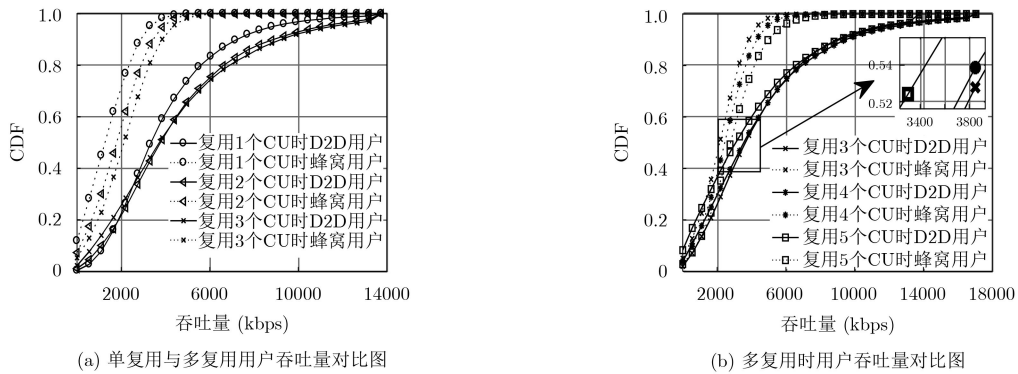


图3 D2D复用不同数量蜂窝时用户吞吐量对比图

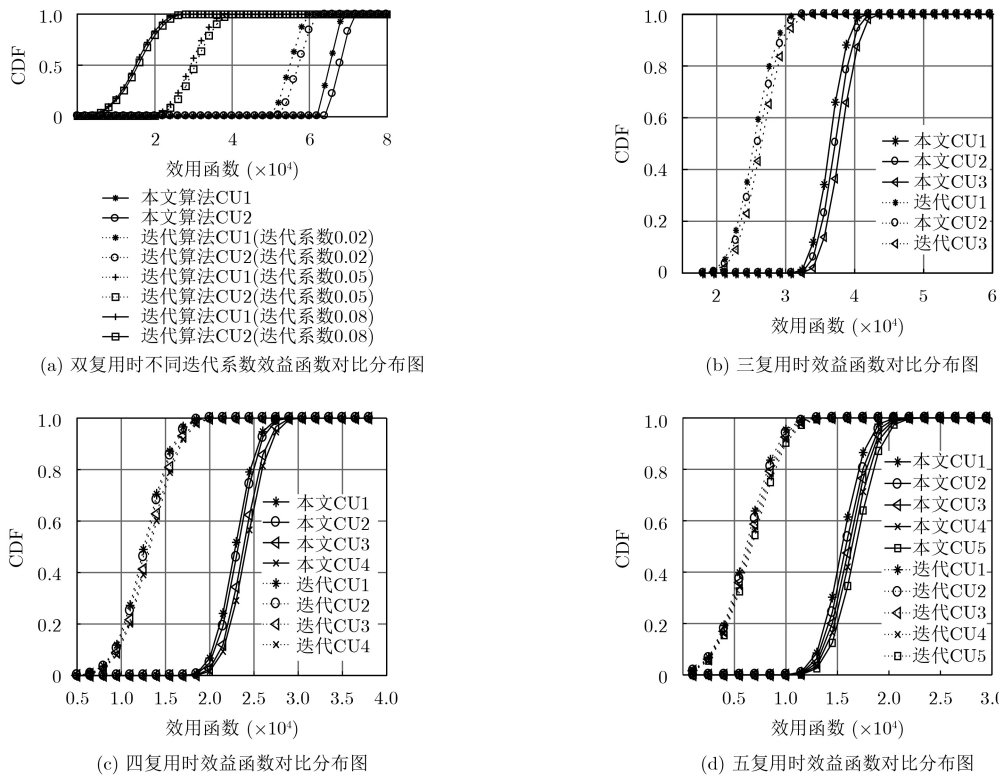


图4 多复用模式效用函数分布图

定次数的迭代，若迭代后的结果处在可行域内，则按其迭代结果分配资源，若达到迭代次数上限以后仍属于不可行解，则为其指定分配上限中值或下限中值，一方面迭代算法未考虑迭代的过程是否具有较优性，另一方面，达到迭代次数上限后若仍处于不可行域则直接赋边界中值也未考虑较优性。本文所提算法针对不可行解，分析研究系统特性，为其寻找可行域内的最优值，使系统效益函数尽可能接近 U_i 的极大值，进而达到可行域内的最大值。综上所述，本文所提算法为用户的不同情况分析设计最优的资源分配方案，明显提升小区通信性能。

6 结束语

本文在单小区D2D通信情境下假设基站拥有通

信信道的完美信息，提出一个D2D用户可以复用多个CU的通信模型，进而提出了一种基于非均衡求解的通信资源分配算法，综合考虑小区通信收益和吞吐量，将小区中被复用的CU作为参赛者，通过小区通信收益的效用函数计算得出最佳响应曲线，当纳什均衡解不存在时分析系统特性，设计最佳资源分配算法，为小区完成资源分配。并通过仿真实验表明可以提升系统吞吐率，提升小区通信性能。

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. 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](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2016129).
- [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](https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5350367).
- [3] KAUFMAN B and AAZHANG B. Cellular networks with an overlaid device to device network[C]. The 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2008: 1537–1541.
- [4] IMRAN A, ZOHA A, and ABU-DAYYA A. Challenges in 5G: How to empower SON with big data for enabling 5G[J]. *IEEE Network*, 2014, 28(6): 27–33. doi: [10.1109/MNET.2014.6963801](https://doi.org/10.1109/MNET.2014.6963801).
- [5] IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G vision and requirements, white paper[EB/OL]. <http://www.IMT-2020.cn>, 2014.
- [6] YANG Lianxin, WU Dan, SHI Hongkui, *et al.* Social-aware joint mode selection and link allocation for Device-to-Device communication underlying cellular networks[J]. *China Communications*, 2018, 15(8): 92–107. doi: [10.1109/CC.2018.8438276](https://doi.org/10.1109/CC.2018.8438276).
- [7] HUANG Hongcheng, XIANG Wei, TAO Yang, *et al.* Relay-assisted D2D transmission for mobile health applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4417. doi: [10.3390/s18124417](https://doi.org/10.3390/s18124417).
- [8] 冯大权. D2D通信无线资源分配研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2015.
FENG Daquan. Resource allocation for D2D communications in cellular networks[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [9] 代海波, 陆恣, 黄永明, 等. D2D通信系统中节能功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 997–1001. doi: [10.11999/JEIT160553](https://doi.org/10.11999/JEIT160553).
DAI Haibo, LU Wen, HUANG Yongming, *et al.* Energy-efficient power control algorithm for D2D communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 997–1001. doi: [10.11999/JEIT160553](https://doi.org/10.11999/JEIT160553).
- [10] DOMINIC S and JACOB L. Distributed resource allocation for D2D communications underlying cellular networks in time-varying environment[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(2): 388–391. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2771778](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2771778).
- [11] HUANG Jun, YIN Ying, ZHAO Yanxiao, *et al.* A game-theoretic resource allocation approach for intercell Device-to-Device communications in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2016, 4(4): 475–486. doi: [10.1109/TETC.2014.2384372](https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2384372).
- [12] JIANG Yanxiang, LIU Qiang, ZHENG Fuchun, *et al.* Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6119–6127. doi: [10.1109/TVT.2015.2472995](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2472995).
- [13] YANG Kai, STEVEN M, XING Chengwen, *et al.* Energy-efficient power control for device-to-device communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(12): 3208–3220. doi: [10.1109/JSAC.2016.26240785](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.26240785).
- [14] NIYATO D and HOSSAIN E. A game-theoretic approach to competitive spectrum sharing in cognitive radio networks[C]. 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Hong Kong, China, 2007: 16–20.
- [15] 钱志鸿, 阎双叶, 田春生, 等. LTE-A网络中D2D通信的资源分配算法研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2287–2293. doi: [10.11999/JEIT180043](https://doi.org/10.11999/JEIT180043).
QIAN Zhihong, YAN Shuangye, TIAN Chunsheng, *et al.* Research on resource allocation algorithm for D2D communications underlying LTE-A networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2287–2293. doi: [10.11999/JEIT180043](https://doi.org/10.11999/JEIT180043).
- 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。
胡良帅: 男, 1995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。
王雪: 女, 1984年生, 副教授, 研究方向为5G通信中的关键技术, 包括D2D通信的模式选择、同步技术, 以及物联网技术。