

全负载蜂窝网络下多复用D2D通信功率分配算法研究

钱志鸿 蒙武杰 王雪* 胡良帅 王鑫

(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

摘要: 针对全负载蜂窝网络中D2D通信的功率分配问题, 该文提出了一种基于非合作完全信息博弈纳什均衡解的多复用D2D通信功率分配算法。以优先保证蜂窝用户通信质量与D2D用户接入率为前提, 设置D2D通信系统上行链路帧结构, 之后建立非合作完全信息博弈系统模型, 引入定价机制到功率分配博弈模型中并分析纳什均衡解的存在性与唯一性, 最后给出该模型的分布式迭代求解算法。仿真结果表明, 随着D2D用户复用数量的增加, 该算法在提升系统吞吐量的同时, 能有效地控制系统内部干扰, 大幅度降低系统总能耗。

关键词: 无线通信; D2D通信; 功率分配; 博弈论

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2939-07

DOI: 10.11999/JEIT190974

Research on Power Allocation Algorithm of Multi-to-One Multiplexing D2D Communication Underlying Full Load Cellular Networks

QIAN Zhihong MENG Wujie WANG Xue HU Liangshuai WANG Xin

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

Abstract: Considering power allocation of D2D (Device to Device) communication in fully loaded cellular networks, a multi-to-one multiplexing D2D communication power allocation algorithm based on the Nash equilibrium solution of non-cooperative complete information game is proposed. The communication quality of cellular users and the access rate of D2D users are guaranteed first, and the uplink frame structure of D2D communication system is given. Then, the non-cooperative complete information game model is established. After that, the pricing mechanism is introduced into the power distribution game model, and the existence and uniqueness of the Nash equilibrium solution are analyzed. Finally, the paper gives a distributed iterative algorithm for the model. The simulation results show that with the increase of the number of D2D pairs, the algorithm not only improves the system throughput, but also controls the internal interference of the system effectively, reduces the total energy consumption of the system greatly.

Key words: Wireless communications; D2D communications; Power distribution; Game theory

1 引言

在强调众连接和智能化的未来移动通信系统中, 智能设备的种类和数量越发繁多, 人们对通信质量的要求也越来越严苛, 适用于未来“万物互联”的通信技术正日益受到人们的关注^[1]。终端直连(Device to Device, D2D)通信技术应用于授权频段, 利用近邻设备信道资源进行数据传输, 使终端

设备具备多种接入选择模式, 提升频谱利用率, 扩大网络容量, 降低通信系统中心节点的数据压力^[2,3]。目前, D2D技术已经成为物联网(Internet of Things, IoT)^[4]与未来移动通信系统实现海量接入的关键技术之一^[5]。

D2D通信旨在通过在邻近的通信设备之间实现直接链路来卸载基站业务路由, 为了将D2D通信的优势充分发挥, 需要解决两个基本问题^[6]: (1)接入D2D通信时如何保证蜂窝用户的通信质量(Quality of Service, QoS); (2)如何分配D2D对之间的发射功率以最大化系统吞吐量。基于这两个问题, 现阶段已有许多有意义的研究成果。Feng等人^[7]提出了一种基于距离准则的3步方案, 为每对允许接入的D2D用户及其可以匹配的蜂窝用户分配功率。Zhou

收稿日期: 2019-12-03; 改回日期: 2020-05-22; 网络出版: 2020-07-14

*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)

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

等人^[8]在保证最小速率的前提下,提出了D2D模式选择、调制编码策略、无线资源和功率分配的联合优化方案,以最小化系统总功耗。然而,上述方案主要为1复1的复用场景,适用于D2D用户数小于蜂窝用户数的情况,当存在大量D2D用户待接入时便不再适用,针对多复1的情况,Yin等人^[9]利用Stackelberg博弈模型设计了一种分布式功率分配方案,将基站设置为领导者,D2D对设置为追随者,通过对干扰进行定价来协调D2D用户与蜂窝用户之间的传输,以非合作的方式竞争频谱,但没有优先保证到蜂窝用户的通信质量不受影响。Zhang等人^[10]将问题分解为D2D链路调度和最优功率分配两个子问题,给出了D2D链路调度算法来选择满足信噪比和发射功率约束的最大D2D链路数,在此基础上提出了优化后功率分配算法,但没有考虑到系统通信时帧结构的设置。Park等人^[11]为小区设置优先级分级提出了一种用博弈论方法解决不协调干扰问题的功率分配方案,但由于优先级的约束小区内部的蜂窝用户通信质量受到影响。上述的系统模型中都存在着一些限制与不足,如何更加合理地对D2D用户与蜂窝用户的通信链路进行设置是研究D2D通信功率分配问题的基础,并且现阶段中多复用场景相比于1复1场景的研究较少,而现实中大量用户接入时必然存在多复用的博弈问题。

针对上述问题,本文提出一种全负载蜂窝网络下多复用D2D用户功率分配算法,主要贡献有:针对全负载蜂窝网络中多D2D用户接入时竞争信道资源的情况,以优先保证蜂窝用户的QoS与D2D用户接入率为前提条件,打破了在D2D通信时以计算的分配结果来确定是否接入设备的做法,这使得蜂窝用户的QoS与D2D用户接入率更加得到保障,具有实际意义;设计基于全负载蜂窝网络D2D通信系统帧结构,对蜂窝用户与D2D用户的上行链路数据传输予以具体实施策略,确定了蜂窝用户与D2D用户的主次关系,给出多复用D2D用户功率分配分布式

迭代算法,通过仿真证明了所提算法在提高系统速率与控制系统功率方面达到了很好的效果。

2 系统模型

本文建立系统模型如图1所示。

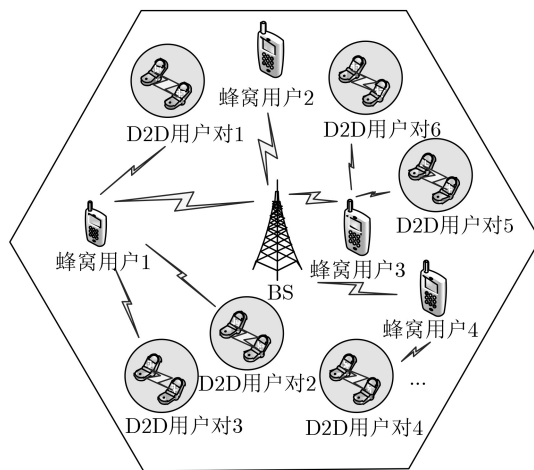


图1 系统模型

通信基站(Base Station, BS)设置于小区中心,小区内存在 X 个待进行功率分配的用户,其中 p 个蜂窝用户,用集合 C_p 表示,另有 q 对D2D用户,用集合 D_q 表示($X = p + q, p < q$)。 p 个蜂窝用户占用系统中所有信道资源,D2D通信复用采用多复1的方式,复用同一蜂窝用户信道资源的D2D用户数为 n 。系统上行链路时通信帧结构的设置如图2,每个子帧分为两个子时隙,第1子时隙完成 C_p 中所有元素的数据通信,第2子时隙所有 D_q 中元素复用 C_p 元素上行链路资源进行数据通信。本文将主要讨论如何为 D_q 中所有元素在复用 C_p 中元素时的最优功率分配问题。

当 n 对D2D用户复用同一蜂窝用户 i 的上行信道链路时,D2D用户之间会产生相互干扰,由于小区内蜂窝用户之间信道正交,蜂窝用户之间干扰便不会产生,本文考虑多径衰落与阴影衰落,它们的瞬时信号与干扰加噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)计算公式及其限制条件分别为

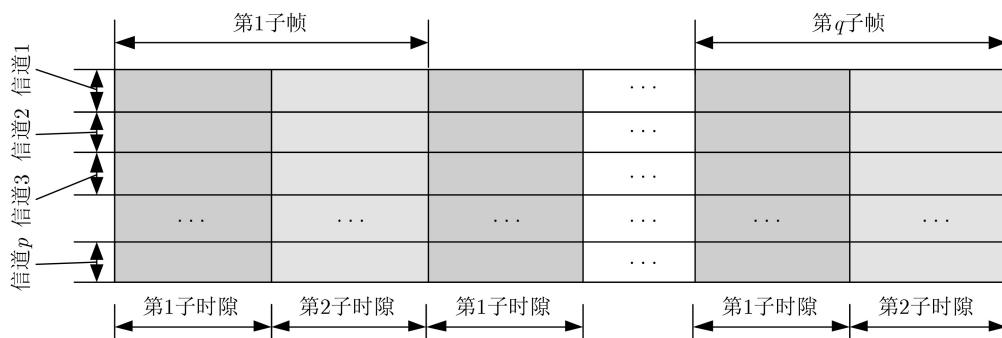


图2 系统通信帧结构

$$\text{SINR}_i^{C_p} = \frac{S_i^{C_p} g_{i,B}}{\sigma_N^2} \quad (1)$$

$$\text{SINR}_j^{D_q} = \frac{S_j^{D_q} g_j}{\sigma_N^2 + \xi_{i,j} \sum_{k=1, k \neq j}^n S_k^{D_q} H_{j,k}} \quad (2)$$

$$\xi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{蜂窝用户 } i \text{ 与 D2D 用户 } j \text{ 复用同一信道资源} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_i^{C_p} \leq S_{\max}^{C_p}, \forall i \in C_p \quad (4)$$

$$S_j^{D_q} \leq S_{\max}^{D_q}, \forall j \in D_q \quad (5)$$

其中, $g_{i,B}$ 与 g_j 分别表示蜂窝用户 i 到基站之间与D2D用户 j 发射端到接收端之间的信道链路增益, $H_{j,k}$ 表示D2D用户 k 发射端到 j 接收端之间的干扰功率增益, $S_i^{C_p}$ 与 $S_j^{D_q}$ 分别表示蜂窝用户 i 与D2D用户 j 的发射功率, $S_{\max}^{C_p}$ 与 $S_{\max}^{D_q}$ 分别表示蜂窝用户与D2D用户的最大发射功率, σ_N^2 为高斯白噪声功率。考虑多径衰落与阴影衰落带来的快衰落 ζ 与慢衰落 v , 定义蜂窝用户发射功率增益^[6] $g_{i,B} = \alpha \zeta_{i,B} v_{i,B} d_{i,B}^{-\chi}$, 其中, α 与 χ 分别表示系统路径损耗常数与路径损耗指数, $d_{i,B}$ 为蜂窝用户 i 到基站的距离, 式(3)用来保证系统正常复用, 式(4)与式(5)用来保证D2D用户的传输功率在可控范围内, 最大化D2D通信的优势, 接下来以系统吞吐量最大化为目标进行优化, 转化问题为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[B \log_2 \left(1 + \text{SINR}_i^{C_p} \right) \right. \\ & \quad \left. + \xi_{i,j} B \log_2 \left(1 + \text{SINR}_j^{D_q} \right) \right] \\ & \text{s.t. } \text{SINR}_i^{C_p} \geq \text{SINR}_{\min}^{C_p}, \forall i \in C_p \\ & \quad \text{SINR}_j^{D_q} \geq \text{SINR}_{\min}^{D_q}, \forall j \in D_q \end{aligned} \quad (6)$$

其中, B 表示信道带宽, $\text{SINR}_{\min}^{C_p}$ 与 $\text{SINR}_{\min}^{D_q}$ 分别表示蜂窝用户 i 与D2D用户 j 的最小SINR门限值。式(6)中的约束条件主要是使系统中干扰可控, 保证蜂窝用户与D2D用户的QoS。下面将利用博弈论对上述问题进行优化。

3 D2D通信功率分配算法

3.1 非合作完全信息博弈建模

为了达到优化目标, 使每一个游戏参与者 j 获得尽可能大的信道链路增益, 利用博弈论中的非合作完全信息博弈来对将第2子时隙中复用同一蜂窝用户的D2D用户进行建模, 该模型为

$$\begin{aligned} \gamma^D &= \left\{ \{j\}, \{S_j^{D_q}\}, \{u_j^{D_q}(\cdot)\} \right\} \\ \text{s.t. } S_{\min}^{D_q} &\leq S_j^{D_q} \leq S_{\max}^{D_q}, \forall j \in D_q \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\{j\} = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示系统内复用同一蜂窝上行链路资源的D2D用户游戏参与者, $\{S_j^{D_q}\} = \{S_1^{D_q}, S_2^{D_q}, \dots, S_n^{D_q}\}$ 表示所有D2D参与者在同一信道链路上所采用的发射功率策略集, $S_{\min}^{D_q}$ 和 $S_{\max}^{D_q}$ 分别表示最大和最小发射功率, $u_j^{D_q}(\cdot)$ 是各D2D用户在同一信道链路上的净效用函数, 约束条件是为了保证游戏参与者的发射功率在合理范围内。接下来针对式(7)进行展开, 令向量 $S_{-j}^{D_q} = \left[\{S_1^{D_q}\}, \{S_2^{D_q}\}, \dots, \{S_{j-1}^{D_q}\}, \{S_{j+1}^{D_q}\}, \dots \right]$ 表示除第 j 个发射功率 $S_j^{D_q}$ 之外的功率向量, 则第 j 个蜂窝用户在其信道链路上最终获得的净效用函数可表示为 $u_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 。接下来引入定价机制, 通过定价机制使每个蜂窝用户在获得发射功率的同时付出相对应的代价, 以此找出效用函数与定价函数之间的最佳平衡点, 进而得出系统最优解。定义定价函数 $\psi_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q}) = \lambda_j^D S_j^{D_q}$, 其中 λ_j^D ($\lambda_j^D \geq 0$)为定价因子, 表示单位功率所需要支付的价格, 则净效用函数为 $u_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q}) = f_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q}) - \psi_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$, $f_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 为第2子时隙内D2D用户的上行链路香农信道容量, 考虑到系统存在一定的误码率(Bit Error Ratio, BER), 引入参数 $\mu = -\ln(5\text{BER})/1.5$ ^[9], 则 $f_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q}) = B \log_2 \left(1 + \frac{\text{SINR}_j^{D_q}}{\mu} \right)$, 可得净效用函数计算公式

$$\begin{aligned} & u_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q}) \\ &= B \log_2 \left(1 + \frac{S_j^{D_q} g_j}{\mu(\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} S_k^{D_q} H_{j,k})} \right) \\ & \quad - \lambda_j^D S_j^{D_q} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 纳什均衡点的存在性与唯一性证明

接下来针对上述模型 γ^D 的纳什均衡点进行深入讨论, 首先讨论 γ^D 纳什均衡点的存在性。对式(8)中净效用函数 $u_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 求1阶偏导与2阶偏导

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_j^{D_q}(S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})}{\partial S_j^{D_q}} &= \frac{B}{\ln 2} \\ & \cdot \frac{g_j}{S_j^{D_q} g_j + \mu \left(\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} S_k^{D_q} H_{j,k} \right)} - \lambda_j^D \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 u_j^{D_q} (S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})}{\partial (S_j^{D_q})^2} = -\frac{B}{\ln 2} \cdot \left[\frac{g_j}{S_j^{D_q} g_j + \mu \left(\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} S_k^{D_q} H_{j,k} \right)} \right]^2 \quad (10)$$

容易得出, 净效用函数 $u_j^{D_q} (S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 的2阶偏导值为负, 故在 $\{S_j^{D_q}\} = \{S_1^{D_q}, S_2^{D_q}, \dots, S_n^{D_q}\}$ 上 $u_j^{D_q} (S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 是连续且为拟凹的函数。

对于非合作完全信息博弈模型 γ^D , 首先, 每个游戏参与者 $\{j\} = \{1, 2, \dots, n\}$ 在其信道链路上的策略空间 $S_j^{D_q} \in [0, S_{\max}^{D_q}]$, 这在欧几里得空间上是闭有界的, 并且容易推出它也是一个非空凸集。其次, 根据上述式(10)已经得出的结论, 即 $u_j^{D_q} (S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})$ 在 $\{S_j^{D_q}\} = \{S_1^{D_q}, S_2^{D_q}, \dots, S_n^{D_q}\}$ 上是连续且为拟凹的函数。综上, 由纳什均衡存在性定理可知, γ^D 的纳什均衡点存在。

接下来讨论非合作完全信息博弈 γ^D 纳什均衡点的唯一性。令 $\frac{\partial u_j^{D_q} (S_j^{D_q}, S_{-j}^{D_q})}{\partial S_j^{D_q}} = 0$, 求得 γ^D 存在的最优解表达式需满足式(11)

$$S_j^{D_q} = \frac{B}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu (\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} S_k^{D_q} H_{j,k})}{g_j} \quad (11)$$

s.t. $\lambda_j^D \leq \frac{B}{\ln 2} \cdot \frac{g_j}{\mu (\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} S_k^{D_q} H_{j,k})}$

其中, 式(11)为最优解表达式, 约束条件是为了保证最优解表达式 $S_j^{D_q} > 0$ 。定义一函数 $I(S_j^{D_q})$, 令 $S_j^{D_q} = I(S_j^{D_q})$, 由纳什均衡定理可知, 当最优解表达式满足正性、单调性和可伸缩性时, 纳什均衡点唯一。可伸缩性见式(12), 由于约束条件的设定, 式(11)满足正性条件。接下来讨论其单调性, 设 $S_1^{D_q} \geq S_2^{D_q}$, 可得式(12)

$$\theta I(S_j^{D_q}) \geq I(\theta S_j^{D_q}), \forall \theta > 1 \quad (12)$$

$$I(S_2^{D_q}) - I(S_1^{D_q}) = \frac{\mu \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,k} H_{j,k} (S_1^{D_q} - S_2^{D_q})}{g_j} \geq 0 \quad (13)$$

由于本文中所有发射功率是大于0的, 因而式(13)等号成立的唯一条件为 $S_1 = S_2$, 根据式(9)与式(13)可以得出, 最优解表达式在其区间上为单调减函数。接下来证明可伸缩性, 过程如下

$$\begin{aligned} \theta I(S) - I(\theta S) &= \frac{B(\theta - 1)}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu \sigma_N^2 (\theta - 1)}{g_j} > (\theta - 1) \\ &\cdot \left(\frac{B}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu \sigma_N^2}{g_j} - \frac{\mu \xi_{i,j} \sum_{k=1, k \neq j}^n S_k^{D_q} H_{j,k}}{g_j} \right) \\ &= (\theta - 1) \\ &\cdot \left(\frac{B}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu (\xi_{i,j} \sum_{k=1, k \neq j}^n S_k^{D_q} H_{j,k} + \sigma_N^2)}{g_j} \right) \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

因此, 最优解表达式满足可伸缩性。综上所述, 非合作完全信息博弈 γ^D 存在且具有唯一纳什均衡点。依据 γ^D 的最优解表达式构造 n 个 D2D 用户 j 复用同一蜂窝用户 i 上行链路时的分布式功率迭代表达式如式(15)

$$S_j^{D_q}(t) = \begin{cases} S_{\min}^{D_q}, & S_j^{D_q} \leq S_{\min}^{D_q} \\ \frac{B}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu \left[\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,j} S_k^{D_q} (t-1) H_{j,k} \right]}{g_j}, & S_{\min}^{D_q} < S_j^{D_q} < S_{\max}^{D_q} \\ S_{\max}^{D_q}, & S_j^{D_q} \geq S_{\max}^{D_q} \end{cases} \quad (15)$$

3.3 D2D通信多复用功率分配策略

接下来引入吞吐量矩阵, 考虑到信道分配后蜂窝用户与D2D用户的通信质量, 本文限制复用同一蜂窝用户 i 的 n 对D2D用户之间的距离 $d_{i,j}$ 需满足 $d_{\min} \leq d_{i,j} < d_{\max}$, 其中, d_{\min} 与 d_{\max} 分别表示 n 对D2D用户两两之间的最小与最大安全距离, 在此范围内的D2D用户可以对满足条件的蜂窝用户的上行链路进行复用, 具体可根据式(2)–式(6)求出, 基于之前博弈策略结果可以求得第2子时隙内D2D用户 j 复用蜂窝用户 i 的吞吐量矩阵

$$Z_{p,q} = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,q} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \cdots & Z_{2,q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{p,1} & Z_{p,2} & \cdots & Z_{p,q} \end{pmatrix} \quad (16)$$

其中, 元素 $Z_{i,j}$ 表示第 j 对D2D用户复用第 i 个蜂窝用户上行链路信道资源时的吞吐量, 若 $Z_{i,j} = 0$, 则表示该复用链路不存在, 为方便后续计算, 定义第1子时隙下吞吐量矩阵

$$\mathbf{Y}_{p,q} = \begin{pmatrix} Y_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Y_{2,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Y_{p,q} \end{pmatrix} \quad (17)$$

其中，元素 $Y_{i,j}$ 表示第1子隙内第 $i(j)$ 个蜂窝用户的信道链路吞吐量，由于此时D2D用户复用链路没有进行数据传输，所以该矩阵仅在对角线上的元素有值。设系统吞吐量矩阵为 $\mathbf{T}_{\text{sum}} = \mathbf{Y}_{p,q} + \mathbf{Z}_{p,q}$ 。

本文以系统吞吐量最大化为目标进行优化，基于以上结论与表达式，给出全负载蜂窝网络下多D2D用户复用蜂窝网络上行链路功率分配算法，如表1所示。

4 仿真结果及分析

本实验的仿真平台是MATLAB R2016a。实验设置的全负载蜂窝网络随机分布有若干蜂窝用户与D2D用户，其中D2D用户采用多复1的复用模式复用蜂窝用户上行链路资源，其他具体仿真参数设置^[7,12]如表2所示。

为验证本文提出的功率分配算法所带来的系统性能增益，令 $n \in [3, 7]$ ，即从3复1至7复1不同复用模式下进行讨论，迭代精度 $\varepsilon = 10^{-5}$ ，定价因子 $\lambda_j^D = 1 \times 10^4$ ，仿真结果如图3、图4，其对比算法

表1 多复用D2D通信功率分配算法

算法1: 功率分配算法	
输入:	$S_{\max}^{Dq}, \lambda_j^D, \varepsilon, \alpha, \chi, N_0, \mathbf{Z}_{p,q}, \mathbf{Y}_{p,q}$
输出:	$S_1^{Dq}, S_2^{Dq}, S_3^{Dq}, \dots, S_n^{Dq}, \mathbf{T}_{\text{sum}}$
(1)	for $i = 1$ to p do
(2)	calculate $\mathbf{Y}_{i,i} = S_i^{Cp}$
(3)	if $S_i^{Cp} \geq S_{\max}^{Cp}$ then $S_i^{Cp} = S_{\max}^{Cp}$
(4)	end for
(5)	$t = 0, \xi_{i,j} = 1, S_j^{Dq}(0) = S_{\max}^{Dq}$
(6)	for $i = 1$ to p do
(7)	for $j = 1$ to n do
(8)	$t = t + 1$
(9)	$S_j^{Dq}(t) = \frac{B}{\lambda_j^D \ln 2} - \frac{\mu \left[\sigma_N^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \xi_{i,j} S_k^{Dq}(t-1) H_{j,k} \right]}{g_j}$
(10)	if $S_j^{Dq}(t) < S_{\min}^{Dq}$ then $S_j^{Dq}(t) = S_{\min}^{Dq}$
(11)	if $S_j^{Dq}(t) > S_{\max}^{Dq}$ then $S_j^{Dq}(t) = S_{\max}^{Dq}$
(12)	end for
(13)	if $ S_j^{Dq}(t) - S_j^{Dq}(t-1) < \varepsilon, j \in [1, n]$ then
(14)	calculate $\mathbf{Z}_{i,j}, \mathbf{T}_{\text{sum}}$
(15)	else go to step (8)
(16)	end for

为注水算法^[13]，该算法是根据信道状况的良好程度来完成对设备功率的自适应分配。其中，图3给出了不同复用模式下系统总功率的变化，由图中可以看出，相较于注水算法，本文所提出的功率分配算法能够极大地降低系统能耗，并且随着复用数量的增多，本文的算法优势越能够得以体现，在 $n = 7$ 时，系统总功率能够下降约83%，总体能耗大大降低。图4给出了不同复用模式下D2D通信系统吞吐量的变化，可以看出，在提升系统吞吐量的同时，

表2 仿真参数

参数	数值
小区半径	1000 m
路径损耗常数(α)	0.01
路径损耗指数(χ)	4
N_0	-114 dBm/Hz
蜂窝用户最大发射功率	48 dBm
D2D用户的最大发射功率	24 dBm
系统带宽	180 kHz
多径衰落	单位均值的指数分布
阴影衰落	均值为0，标准差为8的正态分布
蜂窝用户数	20
D2D用户对数量	60~140
D2D用户之间最大距离	50 m
系统误码率BER	10^{-4}

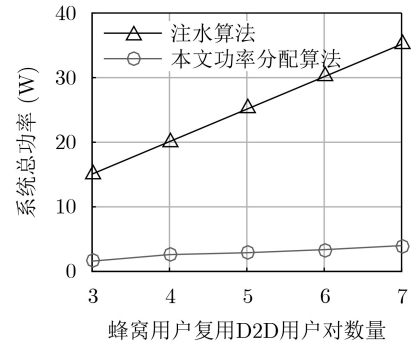


图3 不同复用模式下系统总功率

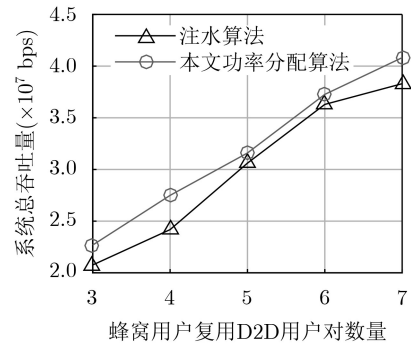


图4 不同复用模式下D2D通信系统吞吐量

能有效地控制系统内部干扰,大幅度降低系统总能耗,在 $n=7$ 时,系统吞吐量提升约5%。

为了更加合理地验证本文所提出的算法在不同复用模式下对D2D通信系统吞吐量提升效果,对算法采用蒙特卡罗方法重复执行1000次,然后对结果取平均值,如图5,给出了 $n \in [3, 7]$ 所有复用模式下D2D通信系统吞吐量的累计分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF),在 $n=3$ 时,本文所提出的功率分配算法相比于注水算法整体上可以达到更高的吞吐量,并且随着D2D用户复用对数的增多,D2D通信系统吞吐量整体稳定上升。图6更具体地给出了 $n=7$ 时的D2D通信系统吞吐量CDF对比情况,可以看出,本文所提出的功率分配算法在 $n=7$ 时比起注水算法吞吐量CDF有所提升,但相对于图5中 $n=3$ 时的对比情况,提升率没有 $n=3$ 时高,这是因为随着D2D用户复用对数的增多,本文所提算法在提高吞吐量的同时,追求更好的功率控制效果。

5 结束语

本文研究了全负载蜂窝网络环境中D2D通信的

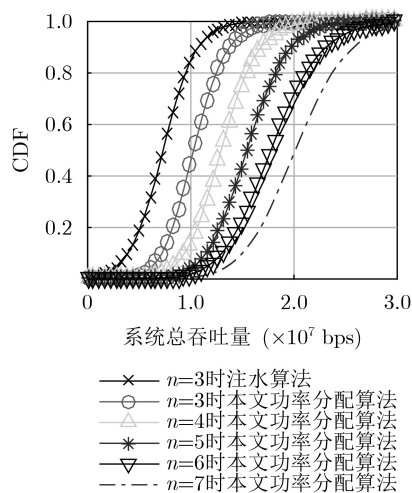


图5 不同复用模式下D2D通信系统吞吐量累积分布函数

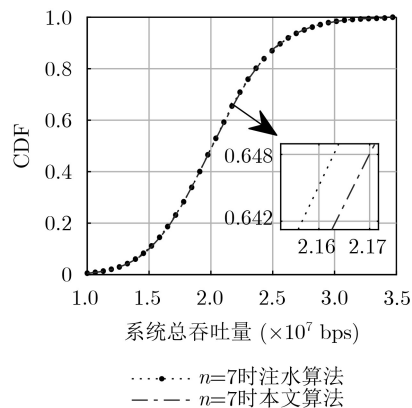


图6 $n=7$ 时D2D通信系统吞吐量CDF对比曲线

功率分配问题,以优先保证蜂窝用户通信质量与D2D用户接入率为前提,以系统吞吐量最大化为目标,提出一种基于非合作完全信息博弈纳什均衡解的多复用D2D通信功率分配算法。本文首先确定系统通信上行链路传输方式,利用非合作完全信息博弈理论对问题建立系统模型,通过引入定价机制与净效用函数到博弈中来求得纳什均衡解,并证明了纳什均衡解的存在性和唯一性,最后采用分布式迭代计算出符合策略约束条件的D2D用户发射功率与系统总吞吐量。仿真验证了 $n \in [3, 7]$ 各种复用情况下本文算法相较于对比算法的性能,可以看出,在3复1到7复1仿真结果中,本文算法在提高系统吞吐量的同时,能有效地控制系统内部干扰,大幅度降低系统总能耗,扩大系统容量,并且随着D2D用户复用数的增加,算法所达到的功率分配效果更好。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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](https://doi.org/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).
- [3] 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).
- [4] 钱志鸿, 田春生, 王鑫, 等. D2D网络中信道选择与功率控制策略研究[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(10): 2287–2293. doi: [10.11999/JEIT190149](https://doi.org/10.11999/JEIT190149).
QIAN Zhihong, TIAN Chunsheng, WANG Xin, *et al.* Research on channel selection and power control strategy for D2D networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(10): 2287–2293. doi: [10.11999/JEIT190149](https://doi.org/10.11999/JEIT190149).
- [5] AHMAD M, AZAM M, NAEEM M, *et al.* Resource management in D2D communication: An optimization perspective[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 93: 51–75. doi: [10.1016/j.jnca.2017.03.017](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.017).
- [6] 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](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2498925).
- [7] 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](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.071013.120787).
- [8] ZHOU Hao, JI Yusheng, LI Jie, *et al.* Joint mode selection, MCS assignment, resource allocation and power control for D2D communication underlying cellular networks[C]. 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Istanbul, Turkey, 2014: 1667–1672. doi: [10.1109/WCNC.2014.6952480](https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952480).
- [9] YIN Rui, ZHONG Caijun, YU Guanding, *et al.* Joint spectrum and power allocation for D2D communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2182–2195. doi: [10.1109/TVT.2015.2424395](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2424395).
- [10] ZHANG Lin, XIAO Ming, WU Gang, *et al.* Efficient scheduling and power allocation for D2D-assisted wireless caching networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(6): 2438–2452. doi: [10.1109/TCOMM.2016.2552164](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2552164).
- [11] PARK S, CHOI S, and LEE B G. Game theory-based power allocation strategy for D2D communication in multi-cell environment[C]. 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, South Korea, 2015: 356–359.
- [12] 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).
- [13] LUO Xiantian, LI Hui, BAI Yaorong, *et al.* Research on power allocation algorithm in non-orthogonal multiple access systems[C]. 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Xi'an, China, 2019: 1084–1089. doi: [10.1109/ICIEA.2019.8834152](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2019.8834152).
- 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。
- 蒙武杰：男，1995年生，硕士生，研究方向为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。
- 胡良帅：男，1995年生，硕士生，研究方向为D2D通信技术。
- 王鑫：女，1982年生，博士生，研究方向为D2D通信技术与物联网。
- 责任编辑：马秀强