

D2D 通信中联合链路共享与功率分配算法研究

田春生, 钱志鸿, 阎双叶, 付 钰

(吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130012)

摘 要: 针对 D2D (Device-to-Device, D2D) 通信过程中的资源分配问题, 提出一种联合链路共享和功率分配算法. 在保证系统内蜂窝用户服务质量 (Quality of Service, QoS) 需求的前提下, 利用系统的信道状态信息, 为 D2D 用户生成一个由蜂窝用户组成的通信链路的候选集合; 在通信链路候选集合内使用凸优化方法得到 D2D 用户最优功率分配策略; 最后利用 (Kuhn-Munkres, KM) 算法求解最大加权二部图匹配 (Maximum Weight Bipartite Matching, MWBM) 问题, 为 D2D 用户选择最优的蜂窝用户进行资源共享. 仿真结果表明该算法能有效的提升通信网络的吞吐量, 可以为 D2D 用户选择最优的资源分配策略.

关键词: D2D 通信; 链路共享; 功率分配; 最大加权二部图匹配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0769-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.001

Research on Joint Link Sharing and Power Allocation Algorithm for Device-to-Device Communications

TIAN Chun-sheng, QIAN Zhi-hong, YAN Shuang-ye, FU Yu

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

Abstract: Considering resource allocation in Device-to-Device (D2D) communications, a joint link sharing and power allocation algorithm is proposed. On the premise of guaranteeing the Quality of Service (QoS) requirements of cellular users in the system, a candidate set of communication links composed of cellular users is generated for the D2D users by using the channel state information of the system. The optimal power allocation strategy for D2D users is obtained by using the convex optimization method in the candidate set of communication links. Finally, the Kuhn-Munkres (KM) algorithm is used to solve the maximum weight bipartite matching (MWBM) problem to find an optimal cellular user partner for each D2D pair to share the resources. Simulation results show that the proposed algorithm can significantly improve the throughput of the communication system and can select the optimal resource allocation strategy for D2D users.

Key words: device-to-device (D2D) communications; link sharing; power allocation; maximum weight bipartite matching (MWBM)

1 引言

当前,随着云计算、物联网、多媒体等无线技术在异构无线网络中的广泛应用,人们对下一代网络的数据量要求更加严苛,因此需要更高速、高效的无线通信技术作为支撑,终端直通 (Device-to-Device, D2D) 技术作为一种新兴的通信技术而备受关注^[1,2]. D2D 技术是指网络中邻近设备之间可以不经基站转发,直接进行信息交换的技术^[3]. 这样能够大幅度提升频谱利用率和吞吐量,扩

大系统容量,为大规模网络的零延迟通信、移动终端的海量接入及大数据传输开辟了新的途径^[4,5].

目前,对于 D2D 通信的资源分配问题已有广泛的研究,文献[6,7]分别提出了一种基于距离的 D2D 资源分配方式,在文献[6]中作者基于 D2D 用户和蜂窝用户与基站之间的距离,提出了一种干扰限制环控制策略来找到合适的蜂窝用户与 D2D 用户共享相同的频谱资源;文献[7]则根据 D2D 用户与蜂窝用户之间的最小距离提出了一种距离限制的资源共享准则来保证 D2D 用

收稿日期:2017-11-07;修回日期:2019-01-08;责任编辑:李勇锋

基金项目:国家自然科学基金 (No. 61771219); 吉林大学基础科研项目 (No. SXGJQY2017-9, No. 2017TD-19); 吉林大学研究生创新基金 (No. 101832018C022)

户通信的中断概率低于某一特定的阈值. 上述文献分别从不同的角度提升了通信系统的性能, 但都只考虑了网络中只有一对 D2D 用户的情形, 而未就长远的角度来设计最优的资源分配策略以提升整个通信网络的资源利用水平. 为此, 在蜂窝网络中多对 D2D 共存的情况下, Zulhasnine M 等人^[8]首先将 D2D 网络中的资源分配问题建模为一个混合整数非线性规划 (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP) 问题, 随后通过基于贪婪思想的启发式算法对该问题进行了求解. Dinh-Van S 等人^[9]将 D2D 用户分成不同的用户组并选择合适的蜂窝用户复用通信资源, 以使得系统内干扰的影响降至最低. 但仍未从根本上解决 D2D 通信过程中的资源分配问题, 系统性能仍有待提高.

本文在现有成果的基础上提出了一种联合链路共享和功率分配算法. 该算法将 D2D 通信的资源分配问题建模为一个最优化问题, 在保证系统内原有蜂窝用户最小 QoS 需求前提下, 利用系统的信道状态信息定义信道增益因子 (Channel Gain Factor, CGF), 为 D2D 用户生成候选通信链路的集合; 在每一个链路候选集合内, 证明 D2D 用户的功率分配问题是一个凸优化问题, 并得到其最优解; 为了降低算法的复杂度, 使用 Kuhn-Munkres (KM) 算法为 D2D 用户选择最佳的链路复用策略. 仿真结果表明此方法可以有效的提升通信网络的吞吐量, 为 D2D 用户选择最优的资源分配策略.

2 系统模型

采用实际部署中典型的 LTE 无线移动蜂窝网络架构, 同时引入 D2D 这种新型通信方式^[10]. 系统架构如图 1 所示, 假设系统中 M 个蜂窝用户与 N 对 D2D 用户共存的情况, 由于在 LTE 通信系统内, 与下行链路相比上行链路具有较低的峰值平均功率比, 并且其通信链路资源利用率较低的特点, 因此, 本文只考虑 D2D 用户通过复用蜂窝用户上行链路的通信资源在直通链路上进行通信的情形^[11]. 假设所考虑的网络是一个全负载网络, 即网络中 M 个蜂窝用户占用了系统中全部的正交信道资源. 分别使用集合 $C = \{1, \dots, M\}$ 和 $D = \{1, \dots, N\}$ 表示系统内的蜂窝用户和 D2D 用户.

在复用模式下, 蜂窝用户 i 与 D2D 用户 j 的信号与干扰加噪声比 (Signal to Interference plus Noise, SINR) 可以表示为:

$$\gamma_i^c = \frac{P_c g_i^c}{\sigma_N^2 + \sum_{j=1}^N \varpi_{i,j} Q_{j,i}^d g_{j,i}^d} \quad (1)$$

$$\gamma_j^d = \frac{Q_{j,i}^d g_j^d}{\sigma_N^2 + \sum_{i=1}^M \varpi_{i,j} P_c g_{i,j}^c} \quad (2)$$

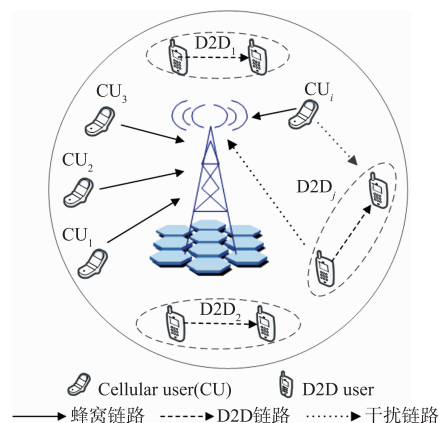


图1 系统模型

其中 $\varpi_{i,j}$ 为蜂窝用户与 D2D 用户通信链路复用指示因子, 当蜂窝用户 i 与 D2D 用户 j 共享频谱资源时其值为 1, 其他情况下其值为 0. P_c 为蜂窝用户的发射功率, $Q_{j,i}^d$ 为 D2D 用户 j 与蜂窝用户 i 共享频谱资源时的发射功率. g_i^c 为蜂窝用户到基站的发射功率增益, g_j^d 为 D2D 用户发射端与接收端的发射功率增益, $g_{i,j}^c$ 为蜂窝用户与 D2D 用户接收端的发射功率增益, $g_{j,i}^d$ 为 D2D 用户发射端与基站间的发射功率增益. σ_N^2 为热噪声功率. 由香农定理可得蜂窝用户 i 与 D2D 用户 j 共享频谱资源时的吞吐量分别为:

$$R_{i,j}^c(Q_{j,i}^d) = B_c * \log_2(1 + \gamma_i^c) \quad (3)$$

$$R_{j,i}^d(Q_{j,i}^d) = B_c * \log_2(1 + \gamma_j^d) \quad (4)$$

当系统内无 D2D 用户与蜂窝用户 i 共享频谱资源时其吞吐量为:

$$R_i^c = B_c * \log_2(1 + P_c g_i^c / \sigma_N^2) \quad (5)$$

其中, B_c 表示通信链路带宽. 为了最大程度的利用 D2D 通信所带来的优势, 以系统吞吐量最大为优化目标, 将问题转换为下面的优化问题:

$$\max_{\varpi_{i,j}, Q_{j,i}^d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R_{i,j}^c(Q_{j,i}^d) + \varpi_{i,j} R_{j,i}^d(Q_{j,i}^d)) \quad (6)$$

$$\text{s. t. } R_{i,j}^c(Q_{j,i}^d) \geq R_{i,\min}^c, \forall i \in C \quad (6a)$$

$$\sum_{j=1}^N \varpi_{i,j} \leq 1, \varpi_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in C \quad (6b)$$

$$\sum_{i=1}^M \varpi_{i,j} \leq 1, \varpi_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall j \in D \quad (6c)$$

$$0 \leq Q_{j,i}^d \leq Q_{\max}^d, \forall j \in D \quad (6d)$$

式中 $R_{i,\min}^c$ 表示满足系统内蜂窝用户 QoS 需求的最小传输速率, 将式(1)和式(3)代入约束条件(6a)可以得到:

$$\sum_{j=1}^N \varpi_{i,j} Q_{j,i}^d g_{j,i}^d \leq (P_c g_i^c / 2^{R_{i,\min}^c / B_c} - 1) - \sigma_N^2 \quad (7)$$

式(7)表示 D2D 用户发射功率与系统内蜂窝用户所要求的最小传输速率之间的关系. 约束条件(6b)和(6c)是为了保证系统中的干扰可控, 只考虑每一个 D2D 用户最多只能复用一個蜂窝用户的通信链路资源以及每

一个蜂窝用户的通信链路最多只允许被一对 D2D 用户复用的情况. Q_{\max} 表示 D2D 用户的最大传输功率, 限制条件(6d) 保证 D2D 用户的传输功率在最大传输功率的限制之内.

很容易得到优化问题(6) 是一个 MINLP 问题, 在系统资源调度周期内很难直接对其进行求解^[12]. 下面将上述优化问题拆分成 3 个子问题逐步进行求解.

3 联合资源共享和功率分配算法

3.1 D2D 用户候选通信链路的选取

定义系统内蜂窝用户 i 与 D2D 用户 j 的 CGF 值 φ_i^j , 其表达式为:

$$\varphi_i^j = (g_i^c \cdot g_{j,i}^d) / (g_{i,j}^c \cdot g_{j,i}^d) \quad (8)$$

在设备发射功率固定的蜂窝小区中, 对于蜂窝用户 i , 与使 φ_i^j 获得最大值的 D2D 用户 j 复用频谱资源可以为整个系统提供更高的吞吐量^[13]. 定义 I_j 为 D2D 用户 j 候选通信链路的集合, 集合中候选通信链路的选取步骤如下:

步骤 1 初始化 $I_j = \emptyset, \forall j \in D, M = C$, 对 $\forall i \in M, j \in D$, 给定初始值 $\varphi_i^j = 0$;

步骤 2 迭代计算 $(i^*, j^*) = \underset{(i,j): i \in M, j \in D}{\operatorname{argmax}} \varphi_i^j$, 并设置如下参数:

$\omega_{i^*, j^*} = 1$, 将蜂窝用户 i^* 和 D2D 用户 j^* 的链路复用因子设置为 1;

$I_{j^*} = I_{j^*} \cup \{i^*\}$, 将 i^* 加入到集合 I_{j^*} ;

$M = M \setminus \{i^*\}$, 将 i^* 从集合 M 内移除.

步骤 3 判断集合 M 是否为空集, 当 M 为空集时进入步骤 4, 否则执行步骤 2;

步骤 4 输出 D2D 用户候选链路集合 I_j 及链路复用因子 φ_i^j .

3.2 D2D 用户与候选蜂窝用户的最优功率匹配

考虑到集合 I_j 中包含着 D2D 用户 j 所有的候选通信链路, 因此对于集合 I_j 中某一特定的蜂窝用户 i , 可以将最优功率的匹配问题建模为:

$$\max_{Q_{j,i}^d} \Psi(Q_{j,i}^d) = \{R_{i,j}^c(Q_{j,i}^d) + R_{j,i}^d(Q_{j,i}^d)\} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \begin{aligned} Q_{j,i}^d &\leq \frac{P_c g_i^c}{(2^{R_{i,j}^c/B_c} - 1) g_{j,i}^d} - \frac{\sigma_N^2}{g_{j,i}^d} \\ &= Q_{j,i}^{d, \max-1}, \forall i \in I_j, j \in D \end{aligned} \quad (9a)$$

$$Q_{j,i}^d \leq Q_{\max}, \forall j \in D \quad (9b)$$

定义 $Q_{j,i}^{d, \max} = \min(Q_{j,i}^{d, \max-1}, Q_{\max})$, 根据约束条件(9a) 和(9b) 有:

$$Q_{j,i}^d \leq Q_{j,i}^{d, \max}, \forall i \in I_j, j \in D \quad (9c)$$

将式(1) ~ (4) 代入 $\Psi(Q_{j,i}^d)$ 中得到:

$$\Psi(Q_{j,i}^d) = B_c * \log_2[(1 + \gamma_{j,i}^d)(1 + \gamma_{i,j}^c)] \quad (10)$$

其中 $\gamma_{j,i}^d$ 与 $\gamma_{i,j}^c$ 分别表示 D2D 用户 j 与蜂窝用户 i 的

SINR. 定义函数 $\Gamma(Q_{j,i}^d)$ 为:

$$\Gamma(Q_{j,i}^d) = (1 + \gamma_{j,i}^d)(1 + \gamma_{i,j}^c) \quad (11)$$

对 $\Gamma(Q_{j,i}^d)$ 求一阶导数有:

$$\frac{\partial \Gamma(Q_{j,i}^d)}{\partial Q_{j,i}^d} = \frac{A(Q_{j,i}^d)^2 + 2BQ_{j,i}^d + C}{D} \quad (12)$$

其中,

$$A = g_j^d (g_{j,i}^d)^2, B = g_j^d g_{j,i}^d \sigma_N^2 \quad (12a)$$

$$C = \sigma_N^2 g_j^d (\sigma_N^2 + P_c g_i^c) \quad (12b)$$

$$- P_c g_{j,i}^d g_i^c (\sigma_N^2 + P_c g_{i,j}^c)$$

$$D = (\sigma_N^2 + Q_{j,i}^d g_{j,i}^d)^2 (\sigma_N^2 + P_c g_{i,j}^c) \quad (12c)$$

从式(12c) 中可以得到 D 恒为正数, $\frac{\partial \Gamma(Q_{j,i}^d)}{\partial Q_{j,i}^d} = 0$

即为 $A(Q_{j,i}^d)^2 + 2BQ_{j,i}^d + C = 0$, 因此有:

$$Q_{j,i}^d = (-B \pm \sqrt{B^2 - AC}) / A \quad (13)$$

根据式(13) 可知当且仅当 $C \leq 0$ 时, 存在 $Q_{j,i}^d \in [0, Q_{j,i}^{d, \max}]$ 满足式(9c) 的约束条件. 计算 $\Gamma(Q_{j,i}^d)$ 二阶导数:

$$\frac{\partial^2 (\Gamma(Q_{j,i}^d))}{\partial (Q_{j,i}^d)^2} = \left(\frac{A(Q_{j,i}^d)^2 + 2BQ_{j,i}^d + C}{D} \right), \quad (14)$$

$$= \frac{2P_c g_{j,i}^d g_i^c (g_{j,i}^d \sigma_N^2 + g_{j,i}^d P_c g_{i,j}^c - g_j^d \sigma_N^2)}{(\sigma_N^2 + Q_{j,i}^d g_{j,i}^d)^3 (\sigma_N^2 + P_c g_{i,j}^c)}$$

当满足条件 $g_{j,i}^d \sigma_N^2 + g_{j,i}^d P_c g_{i,j}^c \geq g_j^d \sigma_N^2$ 时, $\frac{\partial^2 (\Gamma(Q_{j,i}^d))}{\partial (Q_{j,i}^d)^2} \geq 0$ 恒成立. 观察式(12b), 当 $C \leq 0$ 时有:

$$P_c g_{j,i}^d g_i^c (\sigma_N^2 + P_c g_{i,j}^c) \geq \sigma_N^2 g_j^d (\sigma_N^2 + P_c g_i^c) \quad (15)$$

式(15) 两端同时除以 $P_c g_i^c$ 可以得到:

$$g_{j,i}^d (\sigma_N^2 + P_c g_{i,j}^c) \geq \sigma_N^2 g_j^d \left(1 + \frac{\sigma_N^2}{P_c g_i^c} \right) \geq \sigma_N^2 g_j^d \quad (16)$$

即 $\frac{\partial^2 (\Gamma(Q_{j,i}^d))}{\partial (Q_{j,i}^d)^2} \geq 0$ 成立, 优化问题(9) 是一个凸优化问题^[14,15], $Q_{j,i}^d$ 是函数 $\Gamma(Q_{j,i}^d)$ 的一个极值点. 综上所述, 在区间 $[0, Q_{j,i}^{d, \max}]$, 满足等式 $\frac{\partial \Psi(Q_{j,i}^{d, opt})}{\partial Q_{j,i}^{d, opt}} = 0$ 的解

$Q_{j,i}^{d, opt}$ 即为优化问题(9) 的最优解. 因此, 对式(10) 求一阶导数有:

因此, 对式(10) 求一阶导数有:

$$\frac{\partial \Psi(Q_{j,i}^{d, opt})}{\partial Q_{j,i}^{d, opt}} = \frac{B_c}{\ln 2} \left[\left(\frac{1}{Q_{j,i}^{d, opt} + E_1/F_1} \right) + \left(\frac{1}{Q_{j,i}^{d, opt} + E_2/F_2} \right) - \left(\frac{1}{Q_{j,i}^{d, opt} + E_3/F_3} \right) \right] = 0 \quad (17)$$

其中, $E_1 = g_{j,i}^d, F_1 = P_c g_i^c + \sigma_N^2, E_2 = g_j^d, F_2 = P_c g_{i,j}^c + \sigma_N^2, E_3 = g_{j,i}^d, F_3 = \sigma_N^2$. 式(17) 整理可得:

$$\frac{(Q_{j,i}^{d, opt})^2 + GQ_{j,i}^{d, opt} + H}{(Q_{j,i}^{d, opt} + E_1/F_1)(Q_{j,i}^{d, opt} + E_2/F_2)(Q_{j,i}^{d, opt} + E_3/F_3)} = 0 \quad (18)$$

其中, $G = 2 \frac{F_3}{E_3}$, $H = \frac{F_3}{E_3} \left(\frac{F_1}{E_1} + \frac{F_2}{E_2} \right) - \frac{F_1 F_2}{E_1 E_2}$. 由式(18)有, 当 $G^2 - 4H < 0$ 时, $\Psi(Q_{j,i}^d)$ 在区间 $[0, Q_{j,i}^{d,\max}]$ 内单调递增, 此时的最优解可以推导得出 $Q_{j,i}^{d,opt} = Q_{j,i}^{d,\max}$; 当 $G^2 - 4H \geq 0$ 时, $Q_{j,i}^{d,opt}$ 为 $\frac{-G \pm \sqrt{G^2 - 4H}}{2}$ 在区间 $[0, Q_{j,i}^{d,\max}]$ 内的投影^[16]. 具体执行步骤如下:

步骤1 初始化 $X = I_j, \forall j \in D$, 对 $\forall i \in I_j$, 给定初始值 $Q_{j,i}^{d,opt} = 0$;

步骤2 计算投影值 $Q_{j,i}^{d,opt} = [(-G \pm \sqrt{G^2 - 4H}) / 2]_0^{Q_{j,i}^{d,\max}}$, $X = X \setminus \{i\}$, 将元素 i 从集合 X 中删除;

步骤3 当 X 是空集时, 进入步骤4, 否则, 执行步骤2;

步骤4 输出最优功率控制策略 $Q_{j,i}^{d,opt}$.

步骤2中 $[\cdot]_a^b$ 表示在区间 $[a, b]$ 内的投影.

3.3 D2D 用户最佳通信链路的选择

对于蜂窝用户 $i (i \in I_j)$, D2D 用户 j 与其进行通信链路复用所带来的吞吐量的增益为:

$$\xi_{i,j}^{Th} = R_{i,j}^c(Q_{j,i}^{d,opt}) + R_{j,i}^d(Q_{j,i}^{d,opt}) - R_{i,j}^c \quad (19)$$

经过上面的讨论后优化问题(6)可以转化为对如下问题进行求解:

$$\max_{\varpi_{i,j}} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{|I_j|} \varpi_{i,j} \xi_{i,j}^{Th} \quad (20)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{|I_j|} \varpi_{i,j} \leq 1, \varpi_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall j \in D \quad (20a)$$

$$\sum_{j=1}^N \varpi_{i,j} \leq 1, \varpi_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in I_j \quad (20b)$$

其中 $|I_j|$ 表示集合 I_j 中元素个数. 该优化问题属于图论中的最大加权二部图匹配(Maximum Weight Bipartite Matching, MWBM)问题, 其模型如图2所示. 定义 $W_{i,j}$ 表示二部图中的权值, 当蜂窝用户 i 在 D2D 用户 j 的通信链路候选集合内时, 定义权重 $W_{i,j}$ 为蜂窝用户 i 与 D2D 用户 j 共享链路资源时的吞吐量增益, 即 $W_{i,j} = \xi_{i,j}^{Th}$; 其他情况下, $W_{i,j} = 0$. 下面采用 KM 算法对 MWBM 问题求解.

步骤1 构建矩阵 W , 矩阵中第 i 行 j 列的元素即为 $W_{i,j}$. 计算矩阵 W 行与列的权重值, 行的权重值表示为 $Row_i = \max(W_{i,j}), j = 1, 2, \dots, M$, 列的权重值表示为 $Com_j = 0$;

步骤2 构建矩阵 T , 矩阵中的元素表示为 $T_{i,j} = Row_i + Com_j - W_{i,j}$. 在矩阵 T 中找到与 $T_{i,j} = 0$ 相对应的顶点和边, 组成一个子图. 确定这个子图的最大匹配并覆盖相对应的边. 若这个最大匹配是完美匹配则执行步骤4, 否则执行步骤3;

步骤3 在得到的矩阵 T 中, 找出没有被覆盖的最小的元素 α_r , 更新未被覆盖的行的权重值为 $Row_i = Row_i - \alpha_r$, 更新列的权重值为 $Com_j = Com_j + \alpha_r$, 重复执行步骤2;

步骤4 输出步骤2得到的最大匹配, 即为最优的

链路共享策略.

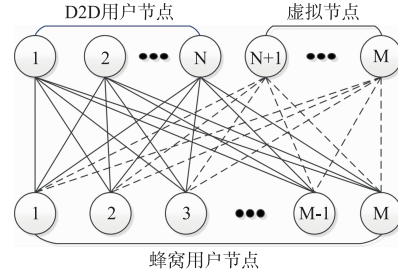


图2 加权二部图模型

4 仿真结果与分析

对本文所提算法在 MATLAB 仿真平台中进行仿真验证, 在 LTE 蜂窝网络中考虑单个小区独立分布的情形, 小区的覆盖半径为 500m. 假设系统内 D2D 与蜂窝链路的阴影衰落均服从均值为 0, 标准差分别为 12dB 与 10dB 的对数正态分布, 其他主要仿真参数如表 1 所示^[17]. 所有仿真结果均为 1000 次蒙特卡罗实验的平均值.

将本文所提出的资源分配算法与另外三种算法进行对比. 第一种算法是随机资源分配算法^[18], 该算法在 D2D 用户随机选择与其复用的蜂窝用户的过程中加入了功率控制机制. 第二种算法是启发式算法^[8], 第三种算法是文献[9]所提算法. 图3给出了不同算法条件下系统吞吐量的累积分布函数曲线. 其中, D2D 用户数 $N = 5$, D2D 用户的最大发射功率 $Q_{\max} = 20\text{dBm}$, 蜂窝用户的最小速率需求 $R_{i,\min}^c = 1.08\text{Mbps}$. 从图中可以看出, 与传统的蜂窝通信相比, 四种算法的性能均得到大幅度提升. 本文所提出的资源分配算法分别比随机资源分配算法、启发式算法和文献[9]中所提算法的最大吞吐量提高了 75%、41% 和 55%.

表1 仿真参数

参数	取值
信道带宽, B_c	180KHz
小区半径	500m
蜂窝用户数, M	10(全负载网络)
D2D 用户数, N	1 ~ 10
蜂窝链路路径损耗模型	$128.1 + 37.6 \log_{10}(d/\text{Km})$
D2D 链路路径损耗模型	$148 + 40 \log_{10}(d/\text{Km})$
噪声功率谱密度	-114dBm/Hz
蜂窝用户发射功率, P_c	24dBm
蜂窝用户最小速率要求	0.36, 0.72, 1.08Mbps
D2D 用户最大发射功率	-15dBm ~ 20dBm

图4给出了系统吞吐量随 D2D 用户数变化的曲线. 其中, D2D 用户的最大发射功率 $Q_{\max} = 20\text{dBm}$, 蜂窝

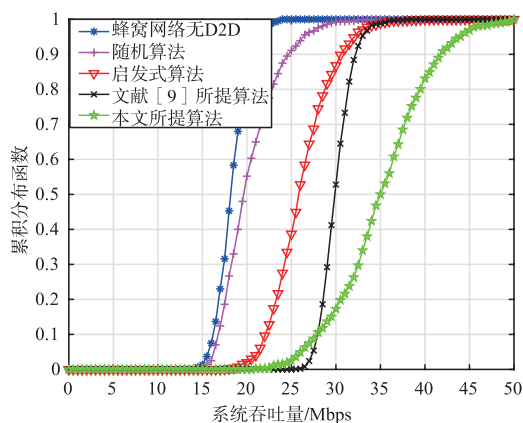


图3 不同算法系统吞吐量的累积分布函数

用户的最小速率需求 $R_{i,\min}^c = 1.08\text{Mbps}$ 。随着 D2D 用户数的增加,四种算法的吞吐量总体上呈现出递增的趋势。随机资源分配算法的吞吐量出现了较为明显的波动,这是由于随机算法在为 D2D 用户分配资源时并未将干扰的因素考虑在内的缘故。在 D2D 用户数相同的条件下,本文所提出的资源分配算法的性能要明显的优于其他三种算法。

图 5 给出了系统吞吐量随 D2D 用户最大发射功率变化曲线。其中, D2D 用户数 $N = 5$ 。从仿真图中可以看出系统的吞吐量随着 D2D 用户最大发射功率的增加而不断的递增,并且本文所提算法的性能得到了很大幅度的提升,当 $Q_{\max} = 20\text{dBm}$ 时,本文所提算法的吞吐量分别比文献[9]所提算法和启发式算法提高了 12% 和 29%。当 D2D 用户的发射功率较小时,系统吞吐量增加的速度较快;当 $Q_{\max} \geq 5\text{dBm}$ 时,曲线的增长开始变得平滑,这意味着此时系统的吞吐量在趋于饱和, D2D 用户的发射功率对于系统吞吐量而言不再起决定性的作用。从仿真图中还可以得出,随着系统内蜂窝用户最小速率需求的不断增加,系统的吞吐量在不断的降低。这是由于当蜂窝用户的速率需求增大时,对与之共享相同频谱资源的 D2D 用户的限制变得更加的严格, D2D 用户的实际发射功率不断减小,最终导致了系统总的吞吐量在不断的降低。

5 结论

本文针对 D2D 通信的资源分配问题,提出了一种联合链路共享和功率分配算法。在满足蜂窝用户 QoS 需求的前提下,推导出 D2D 用户发射功率与蜂窝用户所要求的最小传输速率之间的关系,结合系统的信道状态信息,为 D2D 用户生成通信链路的候选集合;使用凸优化方法得到 D2D 用户的最优功率分配策略;最后利用 KM 算法求解 MWBM 问题,为 D2D 用户选择最佳的蜂窝用户进行链路共享。仿真结果显示该算法通过

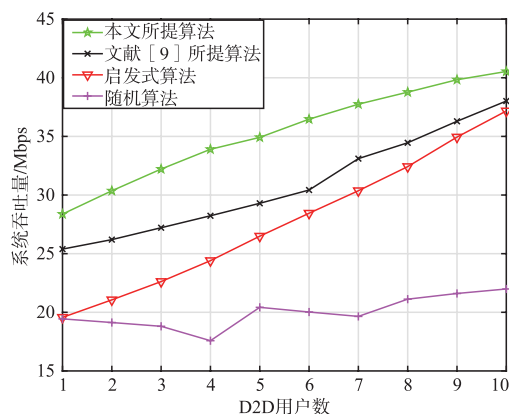


图4 系统吞吐量随D2D用户数变化曲线

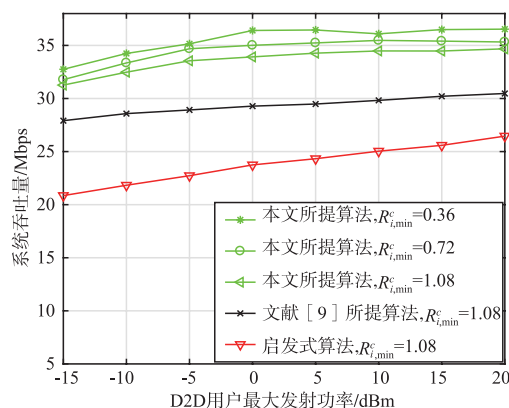


图5 系统吞吐量随D2D用户最大发射功率变化曲线

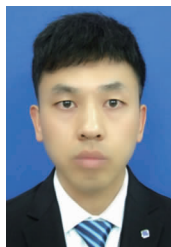
对网络资源进行合理的分配和控制,可以显著提升 D2D 通信网络的整体性能,为 D2D 用户选择最优的资源分配方法。下一步将重点探索在系统内只有部分信道状态信息已知的条件下 D2D 通信的资源分配问题。

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]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2009, 47(12): 42 - 49.
- [2] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023 - 1029.
QIAN Zhi-hong, WANG Yi-jun. IoT technology and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023 - 1029. (in Chinese)
- [3] 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.
QIAN Zhi-hong, WANG Xue. Reviews of D2D technology for 5G communication networks [J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 1 - 14. (in Chinese)
- [4] Ahmad M, Azam M, Naeem M, et al. Resource management in D2D communication: an optimization perspective

- [J]. Journal of Network & Computer Applications, 2017, 93:51 – 75.
- [5] Shen X. Device-to-device communication in 5G cellular networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(2):2 – 3.
- [6] Bao P, Yu G. An interference management strategy for device-to-device underlying cellular networks with partial location information [A]. International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Hangzhou, China: IEEE, 2012. 465 – 470.
- [7] Wang H, Chu X. Distance-constrained resource-sharing criteria for device-to-device communications underlying cellular networks [J]. Electronics Letters, 2012, 48(9):528 – 530.
- [8] Zulhasnine M, Huang C, Srinivasan A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network [A]. International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications [C]. Ottawa, Canada: IEEE, 2010. 368 – 375.
- [9] Dinh-Van S, Shin Y, Shin O. Resource allocation and power control based on user grouping for underlay device-to-device communications in cellular networks[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2017, 28(1):e2920.
- [10] Feng D, Lu L, Yi Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8):3541 – 3551.
- [11] Tang H, Ding Z. Mixed mode transmission and resource allocation for D2D communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1):162 – 175.
- [12] Zhang R, Song L, Han Z, et al. Distributed resource allocation for device-to-device communications underlying cellular networks [A]. International Conference on Communications [C]. Budapest: IEEE, 2013. 1889 – 1893.
- [13] Esmat H H, Elmesalawy M M, Ibrahim I I. Joint channel selection and optimal power allocation for multi-cell D2D communications underlying cellular networks [J]. IET Communications, 2017, 11(5):746 – 755.
- [14] Gjendemsjo A, Gesbert D, Oien G E, et al. Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization [A]. International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks [C]. Sophia-Antipolis, France: IEEE, 2006. 1 – 6.
- [15] 范展, 梁国龙. 基于凸优化的最小旁瓣恒定束宽时域宽带波束形成[J]. 电子学报, 2013, 41(5):943 – 948.
FAN Zhan, LIANG Guo-long. Broadband beamforming with minimum sidelobe and constant beamwidth based on convex optimization [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5):943 – 948. (in Chinese)
- [16] Zhang Y, Li F, Al-Qaness M, et al. A resource allocation scheme for multi-D2D communications underlying cellular networks with multi-subcarrier reusing [J]. Applied Sciences, 2017, 7(2):148.
- [17] ITU-R. Guidelines for Radio Interface Technologies for IMT-Advanced [R]. Report ITU-R M. 2135, 2008.
- [18] Belleschi M, Fodor G, Penda D D, et al. Benchmarking practical RRM algorithms for D2D communications in LTE advanced [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 82(2):883 – 910.

作者简介



田春生 男, 1993年2月生于吉林梅河口, 现为吉林大学通信工程学院博士研究生, 研究方向为 D2D 通信技术与物联网。
E-mail: tianchunsheng2011@163.com



钱志鸿(通信作者) 男, 1957年9月生于吉林长春, 现为吉林大学教授、博士生导师, 主要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。
E-mail: dr. qzh@163.com