



设备直通中面向能效与用户公平性折中的 联合功率控制和调度方案

曲桦^{1,2}, 王璐瑶², 赵季红^{1,3}, 唐睿¹, 朱正仓¹, 曹照鑫¹, 董姣姣³

(1. 西安交通大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学软件学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 设备直通通信作为 5G 系统中的关键技术之一, 可显著提高系统侧和用户侧性能。但目前已有研究主要侧重优化前者。基于此, 提出了一种联合时频域调度和功率控制机制, 以实现系统能效与用户公平性间的折中。该机制包括功率控制和时频域调度两部分, 其中, 功率控制最大化 D2D 用户能效值; 时频域调度确定任意时刻应接入的 D2D 用户数以及各自的信道资源。此外, 借助比例公平思想动态更新匹配所需效用值。通过仿真, 验证了所提联合机制的优势, 并观察了系统整体能效和用户公平间的折中关系。

关键词: 设备直通通信; 能效; 用户公平性; 功率控制; 时频域调度

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016247

Energy efficiency-user fairness tradeoff for device-to-device communication via joint power control and scheduling

QU Hua^{1,2}, WANG Luyao², ZHAO Jihong^{1,3}, TANG Rui¹, ZHU Zhengcang¹, CAO Zhaoxin¹, DONG Jiaojiao³

1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

3. School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China

Abstract: Device-to-device (D2D) communication is a promising component in the fifth generation systems, and it can significantly improve both system-side and user-side performance. However, the prior works are mainly focused on addressing the system-side metrics. Therefore, a balance was struck between EE and UF by joint consideration of power control (PC) and temporal and spectral scheduling (TSS). Specifically, PC was intended to maximize the EE of the D2D user. Based on the above results, TSS determined the set of admitted D2D users and their allocated spectral resources. Moreover, the weights were updated by the idea of proportional fairness dynamically. Finally, the numerical results show the efficiency of the efficiency mechanism and the tradeoff between EE and UF.

Key words: device-to-device communication, energy efficiency, user fairness, power control, temporal and spectral scheduling

收稿日期: 2016-06-01; 修回日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61372092)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61372092)



1 引言

近年来,人们对近距离高速率传输的需求日益增加,设备直通(device-to-device,D2D)通信继而受到了广泛关注^[1,2]。其允许小区内近距离用户设备通过复用已有传统蜂窝网络的授权频谱,在通信对之间直接建立数据传输链路,而无需通过基站中继,其能够有效提高频谱利用率、降低终端能耗和缩短传输时延。此外,D2D通信的上述优势还能够使蜂窝系统提供多样化的应用服务,其中包括基于D2D异构网络的移动云计算框架^[3]、借助D2D通信实现干扰抵消^[4]以及基于D2D多播的内容分发^[5]等应用。基于此,第三代合作伙伴项目(3rd Generation Partnership Project,3GPP)已经开始开展在高级长期演进蜂窝系统中D2D通信的标准化工作^[6]。

然而,在非正交频谱共享模式下,即D2D用户对和蜂窝用户之间共享频谱资源时,共用同一信道的蜂窝链路(cellular link,C-L)与D2D链路(D2D link,D-L)之间会存在同频干扰。资源分配作为无线资源管理技术之一,可以有效缓解上述问题。参考文献[7]通过联合接入控制、功率控制和信道分配最大化系统吞吐量,同时保证已有C-L的服务质量需求;参考文献[8]在多输入多输出(MIMO)场景下最大化混合网络中的总传输速率,通过非协作博弈对联合预编码、功率控制和信道分配问题进行建模和分析;参考文献[9]通过信道分配最大化系统吞吐量,由于原问题具有较高的复杂性(NP-hard),其提出了一种反向迭代组合拍卖机制实现算法性能与复杂度之间的折中;参考文献[10]在保证D-L传输速率要求的前提下通过联合模式选择、功率控制和信道分配最小化系统总能耗,上述问题属于非线性整数规划,一般意义下为NP-hard难题,因此,其被分解为多个子问题并逐一进行求解;此外,参考文献[11]针对上述问题提出了分布式的接入控制和功率控制方案;参考文献[12]在蜂窝通信与D2D通信混合网络下,以D2D通信的系统吞吐量为优化目标,提出了一种联合功率控制和信道分配的优化方案,上述构造问题属于一种混合整数非线性规划,进而信道分配部分采用了粒子群优化算法确定D2D链路最优信道,而功率控制部分则通过优化链路发射功率最大化系统吞吐量并同时考虑接入链路数目,从而权衡了系统吞吐量与接入链路数(属于用户公平性范畴)的折中;参考文献[13]在内容分发场景中联合分发节点选择,功率控制和信道分配分别最大化系统

吞吐量以及最差用户性能,观察并验证了系统侧性能与用户公平性之间的折中关系。

综上所述,参考文献[7-9]通过优化单一或者多维无线资源最大化系统吞吐量,参考文献[10,11]则分别通过集中式和分布式机制最小化系统侧能耗;参考文献[12,13]分别观察了系统吞吐量优化和接入链路数目以及最差用户性能优化,充分说明了系统侧与用户侧性能参数之间的折中关系以及上述折中优化的必要性。但是,还存在以下缺陷:没有考虑用户设备的能量开销以及能耗与吞吐量之间的折中;仅仅考虑了瞬时性能的折中,而实际中,用户的数据传输一般需要多个传输时隙。因此,如何长时间联合多维无线资源实现能效性能与用户公平性(所有用户累计能效性能的均方差)之间的性能折中更具有实际意义。

本文考虑D2D链路密集分布的场景,以均衡D-L用户公平性和系统能效为目标。据此,本文提出联合功率控制和时频域调度的优化方案,在功率控制部分,本文通过功率控制最大化D-L的能效值,同时保证已有C-L的服务质量需求,原始问题属于分数规划^[14],可以借助分数规划的性质将其转化为通过Dinkelbach算法^[14]求解多个参数规划问题,而每个参数规划问题都属于凸优化问题^[15],可分析得到最优解;基于上述结果,时频域调度将长时间公平性的优化转化为单个时隙上的优化以及优化测度的更新。确定每个时隙被调度的D2D链路集合以及它们各自复用的信道资源,该问题等价于二分图中的最大匹配问题,继而采用匈牙利算法^[16]求解;特别地,二分图模型中的效用值不仅考虑了功率控制得到的最优瞬时性能,而且还考虑了每个D2D用户的累积能效性能,此外,本文借助比例公平(proportional fairness,PF)调度算法^[17]思想动态更新上述效用值。仿真结果表明,本文所提出的算法能效和文献算法相比,有明显均衡系统能效和用户公平性的优势。

2 系统模型

本文考虑单小区蜂窝网络上,且系统处于满负荷状态,即信道数目等于接入的蜂窝链路数目,小区内包括C-L与D-L两类链路用户。假设每条D-L中D2D用户间距离足够近,从而满足最大距离约束。每条D-L中包括一个发射端(D2D transmitter,DT)和一个接收端(D2D receiver,DR)。考虑到上下行负载的不对称性,假设D-L复用传统蜂窝网络的上行信道资源;为了避免给C-L产生较大的同频干扰,同时避免在D-L之间的信令传输,本文假设在每

个传输时隙(transmission time interval, TTI), 单信道只允许被单条 D-L 复用, 单条 D-L 也只能复用单个信道资源。本文将 D-L 集合和 D-L 集合分别表示为 $C=\{1, 1, \dots, N\}$ 和 $D=\{1, 1, \dots, M\}$, 其中, N 表示 D-L 的总数目, 而 M 表示 D-L 的总数目, 且 $M \gg N$ 。

在长期演进技术中, 调度发生在每个 TTI 开始之前, 由于系统只有 N 条频带资源, 所以在任意 TTI 中, 最多只有 N 条 D-L 能够接入系统并复用 D-L 资源, 而剩余 $M-N$ 条 D-L 用户则等待传输。系统模型如图 1 所示, 其中系统中一共有两类 D-L, 一类 D-L 可以在本时隙复用信道资源, 另一类则复用不到信道资源; 此外, 系统中有两个信道资源, 分别分配给 DT_1 和 DR_1 以及 DT_2 和 DR_2 , 在同一 TTI, DT_1 和 DR_1 复用 D-L₁ 链路, DT_2 和 DR_2 复用 C-L₂ 链路, 其他 D2D 用户复用不了资源。以 C-L₁ 为例, C-L₁ 的发射端对 D-L 的接收端 DR_1 产生了同频干扰, D-L 的发射端 DT_1 对基站(base station, BS)造成干扰。

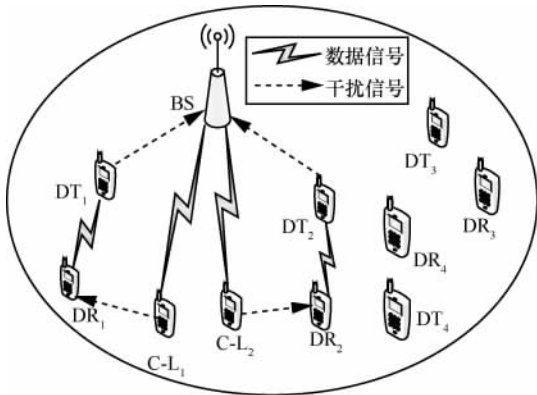


图 1 系统模型示意

本文使用 T 表示总的给定时间长度, 且为每个 TTI 时隙都定义了一个二元变量矩阵 $\{x_{i,j}^{(k)}\} (i \in M, j \in N)$, 表示当前的 D-L 中是否被接入系统以及相应得到的信道资源。在第 k 个时隙, 若第 i 条 D-L 被选择复用第 j 条 C-L, 则 $x_{i,j}^{(k)} = 1$, 否则 $x_{i,j}^{(k)} = 0$ 。如式(1)和式(2)所示, 第 i 条 D-L 和第 j 条 C-L 在第 j 条信道上的归一化吞吐量可以定义为 $R_{i,j}^D$ 和 R_j^C 。

$$R_{i,j}^D = \log \left(1 + \frac{P_i^D g_j^D}{P_j^C g_{j,j}^{CD} + N_i^D} \right) \quad (1)$$

$$R_j^C = \log \left(1 + \frac{P_j^C g_j^C}{P_i^D g_{i,j}^{DC} + N_j^C} \right) \quad (2)$$

其中, P_i^D 和 P_j^C 分别表示第 i 条 D-L 发射端的发射功率

和第 j 条 C-L 发射端的发射功率, g_j^D 表示第 i 条 D-L 发射端到接收端的路径增益, g_j^C 表示第 j 条 C-L 发射端到 BS 的路径增益, $g_{i,j}^{CD}$ 表示第 j 条 C-L 发射端到第 i 条 D-L 接收端的路径增益, $g_{i,j}^{DC}$ 表示第 i 条 D-L 发射端到第 j 条 C-L 接收端的路径增益, N_i^D 表示第 i 条 D-L 链路接收端接收到的噪声, N_j^C 表示第 j 条 C-L 链路接收端接收到的噪声。根据上述表示可得第 i 条 D-L 链路复用第 j 条 C-L 的能效为:

$$EE_{i,j}^D = \frac{R_{i,j}^D}{\alpha P_i^D + 2P_0} \quad (3)$$

其中, $\alpha > 1$ 表示发射端发射功率效率的倒数, P_0 为一个固定值, 表示任意发射端或接收端电路消耗的功率, 由于单条 D-L 中含有一个发射端和一个接收端, 因此总电路功率开销为 $2P_0$ 。同时, 为满足 C-L 用户的服务质量 (quality of service, QoS) 需求, R_j^C 需满足 $R_j^C \geq \beta_j^C, \forall j \in C$, β_j^C 表示第 j 条蜂窝用户的最低速率要求, 由香农公式可求得 $\gamma_j^C \geq \Gamma_j^C \triangleq 2^{\beta_j^C} - 1$, 其中, γ_j^C 表示第 j 条蜂窝链路的信噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR), $\Gamma_j^C \triangleq 2^{\beta_j^C} - 1$ 表示第 j 条蜂窝链路的 SINR 门限。此外, 由于考虑了时域调度, 本文使用 $EE_{i,j}^{D(k)}$ 表示第 k 个时隙, 第 i 条 D-L 复用第 j 条 C-L 资源时的能效值。

为了便于评价本文联合功率控制和时频域调度的性能, 本文引入系统平均总能效 $\overline{EE}$ 和用户平均均方差 $\hat{\theta}$, 如式(4)和式(5)所示。

$$\overline{EE} = \sum_{i=1}^M \overline{EE}_i \quad (4)$$

$$\hat{\theta} = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\overline{EE}_i - \frac{1}{M} \overline{EE} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中, $\overline{EE}_i = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^N EE_{i,j}^{D(k)} X_{i,j}^{(k)}$, 表示第 i 条 D-L 在

T 内的平均能效。

3 联合功率控制和时频域调度机制

为了均衡 D-L 用户公平性和系统能效, 本文提出了一种联合功率控制和时频域调度方案, 时频域调度用于确定单个时隙内接入的 D-L 以及其各自复用的信道资源, 而功率控制是最大化任意 D-L 复用任意信道资源时的能效值。由于时频域调度是基于单个时隙上功率控制所得的功率最



优解,因此,本文第 3.1 节首先介绍面向能效的功率控制机制,基于上述结果,第 3.2 节介绍了联合时频域调度机制。

3.1 功率控制部分

在任意给定的第 k 个时隙,本节通过功率控制最大化每个第 i 条 D-L 复用第 j 个信道的能效值,从而达到优化式(4)的目的,可以描述为 P1。为了简化表示,此处略去所有符号中的时隙上标 k 。

$$P1: \max_{p_i^D \geq 0} EE_{i,j}^D \quad (6)$$

$$\text{s.t. } p_i^D \leq p_{i,\max}^D, \forall i \in D \quad (7)$$

$$\gamma_j^C \geq \Gamma_j^C \triangleq 2^{\beta_j^C} - 1, \forall j \in C \quad (8)$$

其中,式(7)表示第 i 条 D-L 发射端的发射功率上限约束, $p_{i,\max}^D$ 表示第 i 条 D-L 发射端的最大发射功率,式(8)表示蜂窝链路用户 QoS 约束。

经分析,P1 涉及分数规划,属于 NP-hard 难题。根据分数规划的性质^[14],P1 与 P2 相关联,P2 是一个关于参数 q 的优化问题,而 P1 与 P2 最优解之间的关联性可以用引理 1 描述。

$$P2: F(q) = \max_{p_i^D \geq 0} [R_{i,j}^D - q(\alpha p_i^D + 2P_0)] \quad (9)$$

$$\text{s.t. } p_i^D \leq p_{i,\max}^D, \forall i \in D \quad (10)$$

$$\gamma_j^C \geq \Gamma_j^C \triangleq 2^{\beta_j^C} - 1, \forall j \in C \quad (11)$$

引理 1 $F(q)$ 是关于 q 的单调减函数,且如果 q^* 是 P1 的最优解,即 $q^* = \max_{p_i^D \geq 0} EE_{i,j}^D$,当且仅当 $F(q^*)=0$,此时 P2 自变量的最优值 p_i^{D*} 即 P1 自变量的最优解。

证明 证明过程与参考文献[14]类似,此处从略。

根据引理 1,可以借助 Dinkelbach 法^[14]或者二分法得到 P1 的最优解,后续借助 Dinkelbach 法,类似于二分法,其为一个迭代的过程,不断更新 q 值,直到满足引理 1 中的终止条件。Dinkelbach 方法求解 P1 的最优解的步骤如下。

步骤 1 初始化。取 $\delta > 0$ 为很小的正数,其决定 Dinkelbach 法的准确性;用 q 记录当前能效值,初始化 $q=0$ 。

步骤 2 根据当前的 q 值,求解 P2,记此时功率的最优值为 p_i^{D+} 。

步骤 3 如果 $F(q) = \max_{p_i^D \geq 0} [R_{i,j}^D - q(\alpha p_i^D + 2P_0)] < \delta$,此时的 q 值和 p_i^{D+} 即 P1 中的最优能效值以及相应的功率分布,算法结束;否则,根据步骤 2 中得到的最优解 p_i^{D+} 更新 q 值: $q = R_{i,j}^D(p_i^{D+}) / (\alpha p_i^{D+} + 2P_0)$,返回步骤 2。

接下来唯一遗留的问题是如何在任意给定的 $q \geq 0$ 值下,求解 P2。对于给定的第 i 条 D-L,优化问题 P2 的最优解可以归纳为定理 1。

定理 1 P2 是关于功率变量的凸问题,其最优解为 $p_i^{D+} = \min\{\max\{H_i^D, 0\}, L_i^D\}$,其中, $H_i^D = 1/(\ln 2q\alpha) - (p_j^C g_{j,i}^{CD} + N_i^D)/g_i^D$, $L_i^D = \min\{(p_j^C g_j^C / \Gamma_j^C - N_j^C) / g_{i,j}^{DC}, p_{i,\max}^D\}$ 。

证明 如式(12)和式(13)所示,通过求解 P2 中优化目标关于的一阶和二阶偏导,可知 $F(q)$ 是 p_i^D 的凹函数^[15]。P2 中约束条件式(10)是关于 p_i^D 的线性约束,另外,式(11)等价于 $p_i^D \leq (p_j^C g_j^C / \Gamma_j^C - N_j^C) / g_{i,j}^{DC}$, $\forall i \in D$,故 P2 中式(10)和式(11)都是关于 p_i^D , $\forall i \in D$ 的线性约束,因此,P2 是关于 p_i^D 的凸问题^[15]。

令 $\partial F(q, p_i^D) / \partial p_i^D = 0$,得到函数 $F(q, p_i^D)$ 的最小值对应点 $H_i^D = 1/(\ln 2q\alpha) - (p_j^C g_{j,i}^{CD} + N_i^D)/g_i^D$,由式(10)和式(11)求得 $L_i^D = \min\{(p_j^C g_j^C / \Gamma_j^C - N_j^C) / g_{i,j}^{DC}, p_{i,\max}^D\}$,由于函数 $F(q)$ 是 p_i^D 的凹函数,若 $H_i^D < 0$,则最优功率分配为 0,若 $H_i^D > L_i^D$,则最优分配为 L_i^D ; $0 \leq H_i^D \leq L_i^D$ 时,最优功率分配为 H_i^D ,综上所述,P2 的最优功率分配如式(14)所示。

$$\frac{\partial F(q, p_i^D)}{\partial p_i^D} = \frac{g_i^D}{\ln 2(p_i^D g_i^D + p_j^C g_{j,i}^{CD} + N_i^D)} - q\alpha \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 F(q, p_i^D)}{\partial (p_i^D)^2} = \frac{-(g_i^D)^2}{\ln 2(p_i^D g_i^D + p_j^C g_{j,i}^{CD} + N_i^D)^2} < 0 \quad (13)$$

$$p_i^{D+} = \min\{\max\{H_i^D, 0\}, L_i^D\} \quad (14)$$

通过定理 1,得到了 $F(q)$ 以及相应的发射功率分布 p_i^{D+} 后,继而可按照 Dinkelbach 法进行迭代,直到找到最优的 $q^* = \max_{p_i^D \geq 0} EE_{i,j}^D$ 。

3.2 时频域调度

3.2.1 传统机制

(1)单纯侧重系统能效的机制

单纯侧重优化系统能效的分配机制,不考虑 T 内所有 D-L 用户是否可接入网络,只考虑优化每个 TTI 内系统的能效。对于任意给定的第 k 个 TTI,其优化模型如下所示。

$$\max_{X_{i,j}^k \in \{0,1\}, \forall k \in \{1,2,\dots,T\}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N EE_{i,j}^{D(k)} X_{i,j}^k \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^M X_{i,j}^k \leq 1, \forall i \in D, j \in C \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{i,j}^{(k)} \leq 1, \forall i \in D, j \in C \quad (17)$$

式(16)表示单信道仅能被单链路复用,而式(17)则表示单链路仅能复用单信道。

分析可知,式(15)~式(17)在每个时隙的优化目标均为最大化 D-L 总能效,由于 $M \gg N$,所以在每个时隙,只有能效最好的 N 条 D-L 可以复用信道资源,而剩余 $M-N$ 条 D-L 却始终无法通信,严重影响了用户公平性。因此,此方案虽然获得了最高的系统总能效,但却以牺牲用户公平性为代价。

(2) 单纯侧重优化用户公平性的机制

针对只优化单时隙内系统能效分配机制的缺陷,使用时域调度可优化给定时间长度 T 内用户的公平性,其中,轮询调度(round robin, RR)就是一种保证用户公平性的时域调度算法。其具体思想为:首先将 M 条 D-L 依次放入队列中,在每个时隙依次从队首取前 N 条 D-L 进行信道分配,且得到调度的 N 条 D-L 自动排到队尾,从而确保下一时隙其他 D-L 复用资源。轮询调度的目标是保证在 T 内用户被调度次数的均方差最小,其优化模型如式(18)所示:

$$\min_{X_{i,j}^k \in \{0,1\}} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Y_i - \bar{Y}]^2 \quad (18)$$

其中, Y_i 表示第 i 条 D-L 在 T 内被调度的次数,即 $Y_i = \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^N X_{i,j}^k$, $\bar{Y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_i$ 表示 T 内所有 D-L 用户被调度次数的均值。RR 算法按时间依次取 N 条 D-L 进行资源匹配,保证了用户调度次数的公平性,然而,由于优化模型式(18)中并没有考虑用户特定的信道状态,因此,RR 会大幅度降低系统整体能效。

3.2.2 本文算法机制

要保证用户公平性,就需要在时域调度过程中最小化用户的能效均方差 $\hat{\theta}$ 。用户 i 被调度后若下时隙再被调度,其累计平均能效增大,使得其与在本时隙被调度而在其他时隙未被调度的 D-L 平均能效差距增加,由式(5)知,此将导致 $\hat{\theta}$ 增大。为使 $\hat{\theta}$ 减小,则需减小该用户在下一时隙被调度的可能性,从而使得能效值低的 D-L 用户在下一时隙可优先分配资源。

基于此,为了在最大化系统整体能效的同时保证用户公平性,本文引入了变量 $EE_{i,j}^{ref(k)}$, $EE_{i,j}^{ref(k)}$ 表示在 k 时隙第 i 条 D-L 链路用户复用第 j 条 C-L 信道资源调度的效用值。

一方面,在给定时间长度 T 内的时域调度部分,为了使用户服务感受更优, $EE_{i,j}^{ref(k)}$ 与 D-L 用户时间观察窗内的累计能效值 $\overline{EE_i^k}$ 应成反比关系,使得累计能效值小的 D-L 用户在下一时隙效用值增大,从而保证其在以后的时隙可以被分配资源;另一方面,在单一时隙,为了尽可能提高频谱利用率, $EE_{i,j}^{ref(k)}$ 与瞬时能效值 $EE_{i,j}^{D(k)}$ 间应成正比,从而使系统整体能效提升,即 $EE_{i,j}^{ref(k)} = \overline{EE_i^k} EE_{i,j}^{D(k)}$, 其中, $\overline{EE_i^k}$ 可借助 PF 算法思想求得。

PF 算法是一种以降低能效为代价,换取用户公平性的算法。算法思想为:在任意时隙都优先选择信道比较好的用户进行服务,从而提高系统整体效率,某些信道状态较差的用户在长时间没有得到服务后,由于被选中的用户更新的累计速率增加速度要小于未被选中的用户,则会提高状态差的信道与用户被选中的机会。由于本文中的平均使用 PF 更新的平均能效值处于效用值分母中,所以 PF 算法应用到本文场景为:已知在当前时隙下系统中有 N 条 D-L 被选择匹配 N 个信道,其中, $A(k) = \{i \in D | \sum_j X_{i,j}^k = 1\}$ 表示在当前时刻被调度的 D-L 集合,相应地, $D-A(k)$ 表示未被调度的 D-L 集合,一次调度后,第 i 条 D-L 被选定,其能效按式(19)更新:

$$\overline{EE_i^{k+1}} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \overline{EE_i^k} + \frac{1}{T_c} \sum_{j=1}^N X_{i,j}^k EE_{i,j}^{D(k)}, & i \in A(k) \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \overline{EE_i^k}, & i \notin A(k) \end{cases} \quad (19)$$

其中, T_c 表示可移动的观察时间窗常数,当 $k > T_c$ 时, $\overline{EE_i^k}$ 表示第 i 对 D-L 用户在刚过去时间窗 T_c 的累计能效;若 $k < T_c$,则 $\overline{EE_i^k}$ 表示第 i 对 D-L 在过去时间内的累计能效。历史平均窗长 T_c 表示 D-L 能忍受不被调度的时间长度, T_c 越大,表明 D-L 能忍受不被调度的时间越长,即对时延越迟钝; T_c 越小则相反。

经过 PF 算法求出 $\overline{EE_i^k}$, 继而得到 $EE_{i,j}^{ref(k)}$ 后,为最大化系统能效,在单个时隙内需进行信道匹配,从而保证系统整体的能效,本文的优化问题可化为 P3:

$$P3: \max_{X_{i,j}^k \in \{0,1\}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N EE_{i,j}^{ref(k)} X_{i,j}^k \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^M X_{i,j}^k \leq 1, \forall i \in D, j \in C \quad (21)$$



$$\sum_{j=1}^N X_{i,j}^k \leq 1, \forall i \in D, j \in C \quad (22)$$

式(21)表示单信道仅能被单链路复用,而式(22)则表示单链路仅能复用单信道。

在单一时隙 t_k , 问题 P3 等价于图论中最大匹配问题, 因而使用二分图 $G=((A,B),E,W)$ 进行建模, 其中 (A,B) 表示两个互不相交的子集, 如图 2 所示, $A=D-L$ 代表 D-L 的集合, $B=C-L$ 代表 C-L 的集合; E 表示边的集合, 每条边关联两个顶点, 并且两个顶点分别属于两个不同的顶点集, (A,B) 代表 D-L 与 C-L 的复用关系; W 表示集合中边对应的效用值的集合 (A,B) , $W_{i,j}$ 表示 t_k 时第 i 条 D-L 与第 j 条 C-L 匹配对应效用值集合, $W_{i,j}^k = EE_{i,j}^{ref(k)} = EE_{i,j}^{D(k)} / \overline{EE}_i^k$ 。

此二分图的最大匹配问题可借助匈牙利算法求解。在 $k=1$ 时, 不考虑 $\overline{EE}_i^1$, 此时效用值 $W_{i,j}^1 = EE_{i,j}^{D(1)}$, 匹配即与单纯侧重系统能效的机制相似, 但是, 随着时间的推移, 信道间的用户平均速率 $\overline{EE}_i^k$ 发生变化, 从而使得上一时隙被调用的 D-L 的效用值在本时隙减小。由各部分算法复杂度叠加可知, 调度算法的复杂度为 $O(T(\max(M,N)^3 + MNI_{\text{lis}}I_{\text{din}}))$, 其中, I_{lis} 表示利用第 3.1 节二分法计算最优功率变量时所需的最大迭代次数, I_{din} 表示第 3.1 节利用 Dinkelbach 法求解单用户最优能效过程中所需的最大迭代次数。为检验本文算法调度的优势, 以 $\overline{EE}$ 与 $\hat{\theta}$ 作为系统能效和用户公平性的观察目标, 算法步骤如下。

步骤 1 初始化。

由式(1)以及第 3.1 节发射端得到最优发射功率后生成可得 D-L 链路系统能效二维矩阵 EE^D , 算法复杂度为 $MNI_{\text{lis}}I_{\text{din}}$; 令 $k=1$, $EE^{ref(k)} = EE^D$, 其中, $EE_{i,j}^{ref(k)}$ 表示矩阵 $EE^{ref(k)}$ 中第 i 行第 j 列个元素, $1 \leq k \leq T$ 。

步骤 2 根据矩阵 $EE^{ref(k)}$ 使用匈牙利算法匹配信道和 D-L 用户, 得到匹配矩阵 X^k , 矩阵 X^k 某一行中有 1 说明该链路被调度, 且该行对应的列为复用的频带资源, 否则, 表示该链路并未被调度; 调度完成后按式(19)更新

$\overline{EE}_i^{k+1}$, 此步算法复杂度为 $\max(M,N)^3$ 。

步骤 3 若 $k \leq T$, 按照 $EE_{i,j}^{ref(k)} = EE_{i,j}^{D(k)} / \overline{EE}_i^k$ 更新, 令 $k=k+1$, 并返回步骤 1, 此步算法复杂度为 T ; 若 $k > T$, 则算法结束, 根据记录的 $X^k (1 \leq k \leq T)$ 确定 t_k 时刻容许接入的 D-L 用户, 可由式(3)与式(4)计算出 $\overline{EE}$ 与 $\hat{\theta}$ 。

4 仿真结果

仿真考虑单个圆形蜂窝小区, BS 在中心, 所有蜂窝用户与 DT 均匀分布在小区内, DR 分布在以 DT 为中心, 以 5~20 m 为半径的圆形区域, 本文仿真部分使用的主要参数说明和设置详见表 1。本文使用 MATLAB 平台进行仿真, 整个时间长度 T 为 1 000TTI, 记录 T 内复用信道的所有 D-L 的平均能效与复用信道资源 D-L 用户间能效的均方差。

接下来, 本文对比以下 3 种算法机制的用户能效均值(如式(4)所示)和用户能效均值的均方差(如式(5)所示)随着 D-L 数目变化的影响。此外, 由于参考文献[7-13]优化不同性能指标且没有考虑时域调度, 故不具有可比性。

- 传统算法机制 1^[8]: 最大化能效算法, 任意时隙均以系统能效最优为目标, 从而达到整体能效最大化, 未考虑用户体验公平性的算法;
- 传统算法机制 2^[9]: RR 调度算法, 为提高用户体验公平性, 按时间轮转, 在每个时隙依次取前 N 条 D-L 链路进行匹配的算法。
- 本文所提算法机制: 联合了时频域调度和功率控制机制, 时频域调度确定任一个时隙应接入的 D2D 用户以及各自的信道资源, 功率控制针对任意 D2D 用户复用任意蜂窝用户资源时的情形, 最大化 D2D 用户能效值, 从而均衡系统能效和用户公平性的算法, 而且观察了将历史平均窗长 T_c 分别设为 60TTI、80TTI、100TTI 的 3 种情况。

如图 3(a)所示, 首先, 随着 D-L 的增加, 用户能效均值

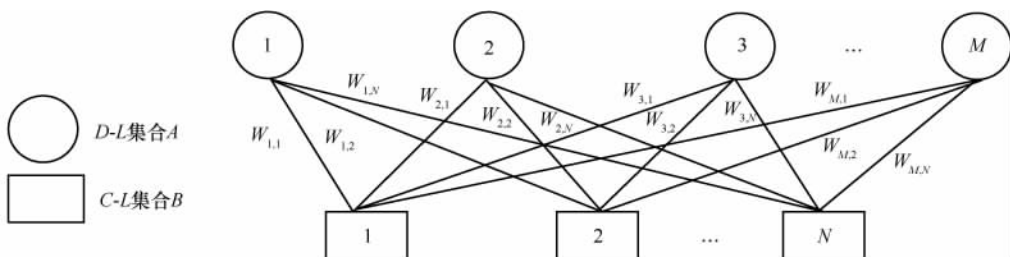


图 2 二分图模型

表 1 主要仿真参数设置

仿真参数	设置
小区半径/m	300
发射端天线类型和天线增益	天线模型:全向型;天线增益:基站/移动终端:14/0 dBi
系统中 C-L 数目/条	10
发射端发射功率效率的倒数	1.5
任意发射端或接收端电路消耗的功率/mW	60
资源块带宽/kHz	180
背景噪声功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
接收端的噪声系数/dB	5(基站)/9(终端)
C-L 发射功率	开环部分路径补偿算法
C-L 的 SINR 门限/dB	7
D-L 最大发射功率/mW	20
路径损耗模型(d 表示链路距离)/dB	C-L:128.1+37.6lg d ; D-L:148.0+40.01lg d

总体呈上升趋势。因为 D-L 的增加使得系统调度 D-L 的选择空间增大,优化了系统能效,所以系统的平均能效随着 D-L 的增多明显上升;但侧重公平性算法机(RR 算法)按时间依次调度 D-L,能效在匹配时 D-L 数目与 C-L 相同有所限制,所以系统能效上升不明显。其次,最大化能效算法系统能效最大,RR 算法系统能效最小,本文所提算法位于两个传统算法之间,并且 T_c 大的系统能效要优于 T_c 小的系统能效。因为由式(20)~式(22)可知, T_c 越大,系统调用时隙越多,最差的 D-L 链路接入次数增多并极大地增加了其能效;RR 算法是按时间顺序选取 D-L 进行匹配,不能兼顾系

统的整体能效,本文所提算法利用效用值更新,使上一时隙被匹配的 D-L 效用值下降,从而在下一时隙提高了剩余 D-L 的匹配概率,使得系统能效居于其他算法之间。以 T_c 为 100TTI 为参考,经计算,本文算法在系统效率方面比 RR 算法提高了 36.34%。

如图 3(b)所示,随着 D-L 的增多,D2D 对间能效均方差呈下降趋势。原因是随着 D-L 数目的增加,D-L 可调度的空间增加,D-L 间的能效差异减少。但是不同算法能效之间存在一定的差异性,其中,最大能效算法的 D-L 用户间能效均方差最大,RR 算法 D-L 间能效均方差最小,本文所提

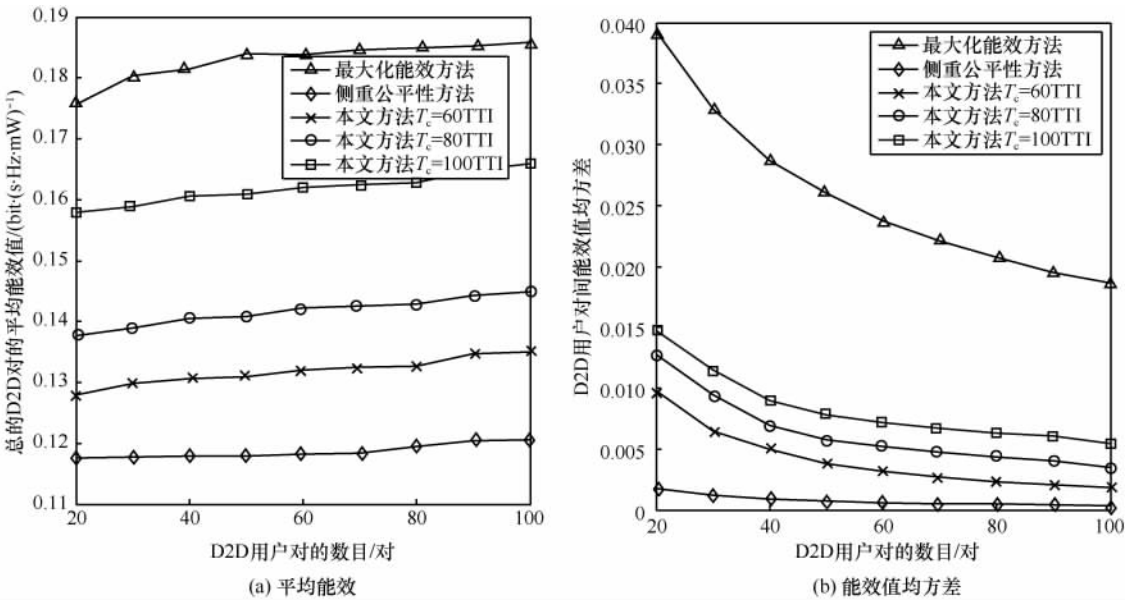


图 3 算法机制能效与公平性仿真结果



算法 D-L 用户间的能效均方差位于两种算法之间, 并且 T_c 越大的 D2D 用户公平性越优。上述现象的原因在于, 由式(20)~式(22)可知, T_c 越小, D-L 瞬时速率对 D-L 用户的累计传输速率的影响越大, 系统资源分配越注重用户公平性, 所以 T_c 越小, D-L 用户能效均方差越小; 最大能效算法在每个 TTI 上调度的用户是固定的, 并没有考虑系统公平性, 因此 D-L 用户能效差异最大; RR 算法以时间轮转调用 D-L, 使得每个用户在一定时间内均可被调用, 优化了 D-L 用户的能效差异; 本文所提机制则引用加效用值, 在保证系统能效的同时, 加大了剩余用户在下一 TTI 被调用的机会, 所以公平性位于最大能效算法与 RR 算法之间。以 T_c 为 100 TTI 为参考, 经计算, 本文算法系统在公平性方面比最大能效算法提高了 67.71%。

5 结束语

本文提出了一种联合功率控制和时频域调度的资源分配机制, 均衡了系统能效和用户公平性。在功率控制部分, 本文最大化单用户能效值, 并借助 Dinkelbach 算法将原问题转化为求解多个参数规划子问题; 在时频域调度部分, 引入效用值, 并借助 PF 算法更新效用值, 进行时域调度, 进而基于时域调度结果在具体单时隙内借助匈牙利算法进行频域调度。通过仿真, 本文观察了所提算法的 D-L 用户能效均值和 D-L 用户间能效的均方差, 相比于传统的纯侧重系统能效与单纯侧重用户公平性机制, 本文所提机制能够均衡系统能效与用户公平性, 其次, 系统能效随着 T_c 的增大而增大, D2D 用户间能效均方差值随着 T_c 的减小而减小, 因此, 在实际中可以通过动态调整上述窗口参数来调整系统能效与用户公平性折中的程度。

参考文献:

- [1] QIAO J, SHEN X M, MARK J W, et al. Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 209-215.
- [2] TANG R, ZHAO J H, QU H, et al. Joint mode selection and resource allocation for mobile relay-aided device-to-device communication[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2016, 10(3): 950-975.
- [3] JO M, MAKSYMUK T, STRYKHALYUK B, et al. Device-to-device based heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing [J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2015, 22(3): 50-58.
- [4] WANG L, TIAN F, SVENSSON T, et al. Exploiting full duplex for device-to-device communications in heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(5): 146-152.
- [5] 王元, 赵季红, 唐睿, 等. D2D 多播场景下面向节能的资源分配机制[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2): 162-167.
WANG Y, ZHAO J H, TANG R, et al. Energy-aware resource allocation for underlaid D2D multicast[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(2): 162-167.
- [6] 3GPP. Radio aspects(release12): TR36.843[S/OL]. (2013-10-09) [2016-06-01]. <http://www.3gpp.org/dynareport/36843.htm>.
- [7] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Optimal mobile association in device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [8] ZHONG W, FANG Y X, JIN S, et al. Joint resource allocation for device-to-device communications underlaying uplink MIMO cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 41-54.
- [9] XU C, SONG L Y, HAN Z, et al. Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: a reverse iterative combinatorial auction based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 348-358.
- [10] GAO C F, SHENG X, TANG J, et al. Joint mode selection, channel allocation and power assignment for green device-to-device communication [C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), June 10-14, 2014, Sydney, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2014: 178-183.
- [11] TANG R, ZHAO J H, QU H. Distributed power control for energy conservation in hybrid cellular network with device-to-device communication[J]. China Communication, 2014, 11(3): 27-39.
- [12] 曲桦, 庄雄, 赵季红, 等. 蜂窝网络下点到点通信中的联合资源优化[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(3): 112-116.
QU H, ZHUANG X, ZHAO J H, et al. Joint resource allocation for device-to-device communication underlaying cellular networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(3): 112-116.
- [13] TANG R, ZHAO J H, QU H. Joint optimization of channel allocation, link assignment and power control for device-to-device communication underlaying cellular network [J]. China Communications, 2015, 12(12): 92-100.
- [14] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming [J]. Management Science, 1967, 13(7): 492-498.
- [15] BYDO S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [16] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment

problem[J]. Naval Research Logistics, 2005, 52(1): 7-21.

- [17] YANG J, ZHANG Y F, WANG Y, et al. Average rate updating mechanism in proportional fair scheduler for HDR [C]//IEEE Global Communications Conference (Globecom), November 29–December 3, Dallas, US. New Jersey: IEEE Press, 2004: 3464-3466.
- [18] DERRICK W K N, ROBERT S. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), July 27, 2012, Ottawa, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2012: 3292-3304.
- [19] GONG W R, WANG X X, LI M M, et al. Round-robin resource sharing algorithm for device-to-device communications underlying SFN system[C]//IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 18–21, 2014, Seoul, Korea. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [20] 3GPP. Physical layer procedures (release 12): TS36.213:2014[S/OL]. (2014-09-17)[2016-06-01]. <http://www.3gpp.org/dynareport/36213.htm>.

[作者简介]



曲桦(1961–),男,博士,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信网、计算机通信网、计算机网络体系结构。



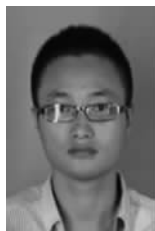
王璐瑶(1992–),女,西安交通大学硕士生,主要研究方向为 D2D 通信和异构网。



赵季红(1963–),女,博士,西安交通大学教授、博士生导师,西安邮电大学教授,主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。



唐睿(1988–),男,西安交通大学博士生,主要研究方向为 D2D 通信和异构网。



朱正仓(1988–),男,西安交通大学硕士生,主要研究方向为未来毫米波传输中 D2D 通信的实现。



曹照鑫(1989–),男,西安交通大学博士生,主要研究方向为 D2D 通信和自组织网络中的路由协议等。



董姣姣(1988–),女,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为 D2D 通信和异构网。