

移动中继协助下终端直通中面向能效的联合中继选择和资源分配方案

曲桦^{①②} 朱正仓^{*①} 赵季红^{①②} 唐睿^① 王璐瑶^② 曹照鑫^①

^①(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

^②(西安交通大学软件学院 西安 710049)

摘要: 在移动中继协助下的终端直通(Device-to-Device, D2D)中, 由于频带复用, D2D 链路与已有蜂窝链路会产生同频干扰。另外, 考虑到终端设备功率受限, 该文提出一种联合功率控制、信道分配和移动中继选择方案最大化 D2D 链路总能量效率。原问题为分数规划问题, 可转化为通过 Dinkelbach 算法求解的参数规划问题, 此外, 上述参数规划问题可进一步分解为功率控制子问题和联合优化信道分配与移动中继选择子问题。其中, 功率控制子问题属于 DC(Difference-of-Concave)规划问题, 其一般意义下为 NP-hard 难题, 可借助序列凸优化方法得到有效的近似解, 基于上述结果, 联合优化信道分配与移动中继选择子问题可转化为二分图中的最大匹配问题, 继而借助匈牙利算法在多项式时间内求得最优解。通过仿真, 验证了该方案在优化能量效率的效果。

关键词: 终端直通; 能量效率; 分数规划; DC(Difference-of-Concave)规划; 二分图匹配

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)10-2464-08

DOI: 10.11999/JEIT161359

Energy-efficient Joint Relay Selection and Resource Allocation Scheme for Mobile Relay Aided Device-to-device Communication

QU Hua^{①②} ZHU Zhengcang^① ZHAO Jihong^{①②} TANG Rui^①
WANG Luyao^② CAO Zhaoxin^①

^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)

Abstract: In mobile relay-aided Device-to-Device (D2D) communication, the co-channel interference between D2D links and the existing links is inevitable due to spectral reuse. Besides, considering the limited battery lifetime of mobile terminals, a joint Power Control (PC), Channel Assignment (CA), and MR-selection scheme is proposed to maximize the global energy efficiency of MR-aided D2D communication. By exploring the property of fraction programming, the original problem can be transferred into solving a sequence of parametric programming problems via the Dinkelbach method. Besides, each parametric programming problem can be decomposed into two subproblems, *i.e.*, the PC subproblem and the joint CA and MR selection subproblem. Moreover, the former turns out to be the Difference-of-Concave (DC), programming which is generally NP-hard, but it can be well addressed by sequential convex optimization technique. Based on the above results, the latter reduces to the bipartite matching problem which can be optimally solved by the Hungarian algorithm in polynomial time. Simulation results verify the efficacy of the proposed scheme.

Key words: Device-to-Device (D2D) communication; Energy efficiency; Fractional programming; Difference-of-Concave (DC) programming; Bipartite matching

1 引言

近年来, 随着近距离高速移动数据业务需求的指数性增长, 终端直通(Device-to-Device, D2D)通信应运而生, 其被看作是下一代移动通信系统(5G)中

关键技术之一^[1]。D2D 通信容许邻近终端间直接建立数据链路, 避免基站的数据转发过程, 其能够有效降低基站负载, 增加系统容量^[2]。然而, 伴随着 5G 中使用毫米波通信, 信号传输的路径损耗增加, 绕过和穿透障碍物的能力减弱, 致使通信距离大幅度缩短, 无法满足远距离 D2D 链路的服务质量(Quality-of-Service, QoS)需求^[3]。因此, 可借助当前无通信业务空闲的移动蜂窝用户作为移动中继(Mobile Relay, MR)扩展 D2D 通信范围, 此场景已引起 3GPP 标准化组织和业内的广泛关注^[4,5], 其应用场景包括移动中继协作传输^[3,6,7]、车联网^[8]等。

然而, 为提高小区的频谱利用率, D2D 链路(Device-to-device Link, DL)用户和 MR 用户复用已

收稿日期: 2016-12-13; 改回日期: 2017-04-06; 网络出版: 2017-05-18

*通信作者: 朱正仓 805495019@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372092, 61531013), 国家 863 计划(2014AA01A707), 江苏省自然科学基金(BK20141214), 教育部中国移动科研基金(MCM20150102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372092, 61531013), The National 863 Program of China (2014AA01A707), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20141214), The Research Fund of Ministry of Education-China Mobile (MCM20150102)

有蜂窝链路(Cellular Link, CL)用户资源, 因此不可避免地会产生同频干扰问题。为解决上述问题, 需设计合适的无线资源分配方案^[9-14]。文献[9]借助模式选择和中继选择优化系统总吞吐量, 但未考虑用户的 QoS 需求。文献[10]中联合信道分配和中继选择最大化 DL 总吞吐量, 将模型问题公式化为 0-1 整数非线性规划问题并通过分支-切割法求解, 但未将功率控制纳入联合优化范围。文献[11]在中继协助蜂窝小区边缘用户通信场景下提出一种简化的联合中继选择和资源分配机制提升系统吞吐量, 同样未在联合优化过程中考虑用户功率。文献[9-11]均以系统吞吐量为优化目标, 使用户设备产生严重的能量损耗。为减小能耗, 增强用户终端的待机时间, 实现吞吐量和耗费能量的折中, 能效的优化备受关注^[12-14], 基于此, 文献[12]在两跳中继场景中, 设计了一种低复杂度的联合资源分配算法, 优化单条 DL 用户的能效。文献[13]在频分复用的多中继网络中, 借助功率控制和中继选择等优化单条 DL 用户的能效, 并提出一种协调小区间干扰的频率复用策略。鉴于文献[12, 13]仅考虑单条链路的场景, 在多条 DL 场景下, 文献[14]提出了一种联合信道分配和功率控制机制优化系统能效, 但未能联合考虑 DL 链路能效与 CL 链路的 QoS。

综上所述, 文献[9-14]存在以下不足: (1)忽略了蜂窝用户的 QoS 需求^[9-11, 13, 14]。(2)没有充分联合考虑功率控制、信道分配和中继选择优化资源分配^[10, 11]。(3)仅以吞吐量为优化目标^[9-11], 忽略了终端设备有限的待机能力或仅考虑单链路场景优化系统能量效率^[12, 13]而忽略了多用户场景下整体能效的优化。(4)未能联合考虑 DL 链路的能效与 CL 链路的 QoS^[14]。因此, 本文考虑 MR 协助下的 D2D 通信系统, 联合功率控制, 信道分配和 MR 选择优化 DL 的总能效。此外, 考虑到 MR 的有限处理能力, 本文假定在 MR 侧部署双向放大转发(Two-Way Amplify-and-Forward, TW-AF)中继协议。文中原问题为分数规划问题, 可将其转化为通过 Dinkelbach 方法求解的参数规划子问题, 该问题可进一步分解为功率控制和联合信道分配与 MR 选择两个子问题。前一个子问题为非凸优化问题, 先将其改写为 DC(Difference-of-Concave)规划问题, DC 规划在一般意义下为 NP-hard 难题, 可以借助 SCO 机制得到有效的近似解。此外, 根据中继可被复用的特殊性, 我们将后一个子问题转化为图论中二分图的最大匹配问题, 继而通过匈牙利算法在多项式时间内得到理论最优解。仿真结果表明本文算法在优化 DL 总能效方面优于已有参考算法。

2 系统模型与问题构建

本文假设在单蜂窝小区 D2D 用户与蜂窝用户共

存的异构网络中, D2D 用户复用蜂窝用户上行信道资源并借助中继转发信号, 小区内有单个基站(b), M 个 D2D 用户对 $(d1, d2)$, T 个中继节点(w)和 N 个蜂窝用户(c), D2D 对 $(d1, d2)$ 使用 TW-AF 中继方式通信, 其分成两个时隙传输信号, 第 1 时隙 $(d1, d2)$ 同时复用相同的下行信道向中继节点传输信号, 第 2 时隙, 中继节点同样复用下行信道向 $(d1, d2)$ 传输信号。其中, 假定小区有 N 个正交资源块被完全分配到 N 个不同的蜂窝链路 CL, 且基站 b 知道所有相关的信道状态信息, 为方便表示, 将蜂窝用户 CL, D2D 对 DL, 中继用户 MR 的集合分别表示为 $C = \{1, 2, \dots, N\}$, $D = \{1, 2, \dots, M\}$, $K = \{1, 2, \dots, T\}$ 。

我们将第 j 个用户 A 复用信道 i 并通过中继 r 转发信号的发射功率记为 $p_{i,j,r}^A$, A 为集合 $\{d1, d2, w, b, c\}$ 中的某一元素, 可将链路 A-B 间的信道增益记为 $h_{i,j,r}^{AB}$, 其中, 用户 B 为集合 $\{d1, d2, w, b, c\}$ 中的某一个元素, $A \neq B$, 且假定 $h_{i,j,r}^{AB} = h_{i,j,r}^{BA}$, 用户 A 的发射信号为 $s_{i,j}^A$ 。特别地, 在 CL 中, 第 i 个 c 用户的发射功率可简化记为 p_i^c , 其与基站间的信道增益记为 h_i^c , 其发射信号记为 s_i^c , n_0 为加性高斯白噪声, 服从分布 $N(0, N_0)$ 。

第 1 时隙 $d1, d2$ 用户复用蜂窝用户 c 的上行资源向中继 w 发射信号, 中继 w 接收信号为

$$y_{i,j,r}^w = \left(p_{i,j,r}^{d1}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{d1w} s_{i,j}^{d1} + \left(p_{i,j,r}^{d2}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{d2w} s_{i,j}^{d2} + \left(p_i^c\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{cw} s_i^c + n_0 \quad (1)$$

中继 w 接收信号后, 归一化并以功率 $p_{i,j,r}^w$ 发送, 即将信号放大 $G_{i,j,r}$ 倍, 其中 $G_{i,j,r} = \left(p_{i,j,r}^w / \left(p_{i,j,r}^{d1} |h_{i,j,r}^{d1w}|^2 + p_{i,j,r}^{d2} |h_{i,j,r}^{d2w}|^2 + p_i^c |h_{i,j,r}^{cw}|^2 + N_0\right)\right)^{1/2}$ 。第 2 时隙, 中继 w 同时向 $d1, d2$ 用户传输信号, 接收信号如式(2)、式(3)所示。

$$y_{i,j,r}^{d1} = G_{i,j,r} \left(p_{i,j,r}^{d1}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{d1w} h_{i,j,r}^{wd1} s_{i,j}^{d1} + G_{i,j,r} \left(p_{i,j,r}^{d2}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{wd1} h_{i,j,r}^{d2w} s_{i,j}^{d2} + G_{i,j,r} h_{i,j,r}^{wd1} n_0 + G_{i,j,r} \left(p_i^c\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{wd1} h_{i,j,r}^{cw} s_i^c + \left(p_i^c\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{cd1} s_i^c + n_0 \quad (2)$$

$$y_{i,j,r}^{d2} = G_{i,j,r} \left(p_{i,j,r}^{d1}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{d1w} h_{i,j,r}^{wd2} s_{i,j}^{d1} + G_{i,j,r} \left(p_{i,j,r}^{d2}\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{d2w} h_{i,j,r}^{wd2} s_{i,j}^{d2} + G_{i,j,r} h_{i,j,r}^{wd2} n_0 + G_{i,j,r} \left(p_i^c\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{wd2} h_{i,j,r}^{cw} s_i^c + \left(p_i^c\right)^{1/2} h_{i,j,r}^{cd2} s_i^c + n_0 \quad (3)$$

用户接收信号后消除自身信号干扰, 用户 $d1$ 接收端的信干噪比 $\eta_{i,j,r}^{d1}$ 为

$$\eta_{i,j,r}^{d1} = p_{i,j,r}^{d2} |h_{i,j,r}^{wd1}|^2 |h_{i,j,r}^{d2w}|^2 G_{i,j,r}^2 / \left(p_i^c |h_{i,j,r}^{wd1}|^2 |h_{i,j,r}^{cw}|^2 G_{i,j,r}^2 + |h_{i,j,r}^{wd1}|^2 N_0 G_{i,j,r}^2 + p_i^c |h_{i,j,r}^{cd1}|^2 + N_0 \right) \quad (4)$$

为方便表示, 令 $a_{i,j,r}^1 = |h_{i,j,r}^{d1w}|^2 / (p_i^c |h_{i,j,r}^{cw}|^2 + N_0)$, $a_{i,j,r}^2 = |h_{i,j,r}^{d2w}|^2 / (p_i^c |h_{i,j,r}^{cw}|^2 + N_0)$, $b_{i,j,r}^1 = |h_{i,j,r}^{d1w}|^2 / (p_i^c |h_{i,j,r}^{cd1}|^2 + N_0)$, $b_{i,j,r}^2 = |h_{i,j,r}^{d2w}|^2 / (p_i^c |h_{i,j,r}^{cd2}|^2 + N_0)$ 。

则 $\eta_{i,j,r}^{d1}$ 为

$$\eta_{i,j,r}^{d1} = p_{i,j,r}^w p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 b_{i,j,r}^1 / \left(p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 + p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 + p_{i,j,r}^w b_{i,j,r}^1 + 1 \right) \quad (5)$$

其中, 用户 d1 的吞吐量为 $R_{i,j,r}^{d1} = \lg(1 + \eta_{i,j,r}^{d1})$ 。同理, 用户 d2 的信干噪比 $\eta_{i,j,r}^{d2}$ 为

$$\eta_{i,j,r}^{d2} = p_{i,j,r}^w p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 b_{i,j,r}^2 / \left(p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 + p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 + p_{i,j,r}^w b_{i,j,r}^2 + 1 \right) \quad (6)$$

式中, 对应的用户 d2 的吞吐量为 $R_{i,j,r}^{d2} = \lg(1 + \eta_{i,j,r}^{d2})$ 。因此, DL 链路的总能效为

$$EE^D = \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) / \left(\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0 \right) \quad (7)$$

其中, $\varepsilon > 1$ 为发射机功率效率的倒数值, p_0 表示发射端和接收端电路功率的消耗值, $x_{i,j,r}$ 是二元变量, $x_{i,j,r} = 1$ 表示 D2D 对 j 通过中继 r 复用信道 i 通信, 否则 $x_{i,j,r} = 0$ 。

为保证已有蜂窝链路的 QoS 需求, 需知道蜂窝链路的信干噪比表达式, 在第 1 时隙, DL 复用下行信道资源, 基站接收信号的信干噪比 $\gamma_{i,j,r}^{c1} = p_i^c |h_i^c|^2 / (p_{i,j,r}^{d1} |h_{i,j,r}^{d1b}|^2 + p_{i,j,r}^{d2} |h_{i,j,r}^{d2b}|^2 + N_0)$ 。第 2 时隙, DL 复用相同下行资源, 蜂窝用户接收信号的信干噪比 $\gamma_{i,j,r}^{c2} = p_i^c |h_i^c|^2 / (p_{i,j,r}^w |h_{i,j,r}^{wb}|^2 + N_0)$ 。

文中在确保已有蜂窝链路的 QoS 需求下, 联合功率控制、中继选择和信道分配优化 D2D 链路的总能效, 其具体模型公式化为问题 1:

$$\text{问题1: } \max_{x_{i,j,r} \in \{0,1\}, p_{i,j,r}} EE^D \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } \gamma_{i,j,r}^{c1} \geq \theta_{th}^{c1}, \gamma_{i,j,r}^{c2} \geq \theta_{th}^{c2}, \forall i \in C, j \in D, r \in K \quad (8a)$$

$$0 \leq p_{i,j,r}^w \leq p_{\max}^w, 0 \leq p_{i,j,r}^{d1} \leq p_{\max}^{d1}, 0 \leq p_{i,j,r}^{d2} \leq p_{\max}^{d2}, \forall i \in C, j \in D, r \in K \quad (8b)$$

$$\sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} \leq 1, \forall i \in C \quad (8c)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} \leq 1, \forall j \in D \quad (8d)$$

其中, $\mathbf{p}_{i,j,r} = [p_{i,j,r}^{d1} p_{i,j,r}^{d2} p_{i,j,r}^w]^T$, 式(8a)表示 DL 对 CL 的干扰限制, 式(8b)表示对应的功率限制, 式(8c)表示单个信道只能被单个用户复用, 式(8d)表示单个 D2D 对只能复用单个信道。

3 联合 MR 选择和资源分配方案

3.1 问题分解

优化问题 1 属于非线性分数规划问题, 根据分数规划性质^[15], 问题 1 与式(9)中的问题 2 相关联, 问题 1 与问题 2 的最优解之间的相关性通过定理 1 描述, 问题 2 如式(9)所示。

$$\text{问题2: } J(q) = \max_{x_{i,j,r}, p_{i,j,r}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) - q \left(\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0 \right) \quad (9)$$

s.t. 式(8a); 式(8b); 式(8c); 式(8d)

定理 1 若 q^* 是问题 1 的最优目标值, 当且仅当 $J(q^*) = 0$ 成立, 此时问题 2 自变量的最优解 $\mathbf{p}_{i,j,r}^*$ 和 $x_{i,j,r}^*$ 即为问题 1 自变量的最优解。

证明 首先, 若 q^* 是问题 1 的最优目标值, $q^* = \max_{x_{i,j,r} \in \{0,1\}, p_{i,j,r}} EE^D \geq EE^D$, 所以 $\sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) - q^* (\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0) \leq 0$, 因此可知 $J(q^*) = \max_{x_{i,j,r}, p_{i,j,r}}$

$\sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) - q^* (\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0) = 0$ 。其次, 若问题 2 中 $J(q^*) = 0$, 则 $\sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) - q^* (\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0) \leq 0$, 可见 $q^* \geq EE^D$, 即 q^* 是问题 1 的最大值。故若 q^* 是问题 1 的最优目标值, 当且仅当 $J(q^*) = 0$ 成立, 此时问题 2 自变量的最优解 $\mathbf{p}_{i,j,r}^*$ 和 $x_{i,j,r}^*$ 即为问题 1 自变量的最优解。详细证明见文献[15]。

根据定理 1, 可以借助 Dinkelbach 法得到问题 1 的最优解, 如表 1 所示, Dinkelbach 法是一个通过迭代更新 q 值的过程, 直到满足终止条件。

问题 1 的非线性分数规划问题可通过表 1 中 Dinkelbach 算法求解, 其关键在于每次在迭代中求解参数规划问题 2, 所得解为问题 1 的近似最优解, ρ 决定近似解的准确度。

由表 1 可知, 如何解决步骤 1 中在任意给定的 $q \geq 0$ 值下求解问题 2 成为关键, 可见定理 2。

表 1 Dinkelbach 方法求解问题 1 的最优解

初始化:	令 ρ 为很小的正数, 其决定该算法准确性, 使用 q 值记录能效的收敛过程, 初始化 $q = 0$ 。
步骤 1	根据当前的 q 值求解问题 2, 此时问题 2 自变量的最优值记为 $\hat{\mathbf{p}}_{i,j,r}$ 和 $\hat{x}_{i,j,r}$;
步骤 2	更新 $\mathbf{p}_{i,j,r} = \hat{\mathbf{p}}_{i,j,r}$, $x_{i,j,r} = \hat{x}_{i,j,r}$, 如果 $J(q) = \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) - q \left(\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0 \right) < \rho$ 时, 则算法结束, 此时的 q 值和 $\hat{\mathbf{p}}_{i,j,r}$, $\hat{x}_{i,j,r}$ 为 P2 中的最优能效值 q^* 以及相应的最优功率 $\mathbf{p}_{i,j,r}^*$ 和最优二元变量 $x_{i,j,r}^*$; 否则, 更新 q 值, 其中 $q = \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2}) / \left(\varepsilon \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} (p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) + 3Mp_0 \right)$, 返回步骤 1。

定理 2 在确定的 q 值下, 问题 2 可转化为式(10)中的问题 3 和式(11)中的问题 4。

证明 当 q 值确定, $J(q)$ 可简化为 $U(\mathbf{p}_{i,j,r}, x_{i,j,r}) = \max_{\mathbf{p}_{i,j,r}, x_{i,j,r} \in \{0,1\}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} H_{i,j,r}$, 其中, $H_{i,j,r} = R_{i,j,r}^{d1} + R_{i,j,r}^{d2} - q\varepsilon(p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w)$, 因功率矩阵 $\mathbf{p}_{i,j,r}$ 中元素和 $x_{i,j,r}$ 相互独立, 可交换优化求和顺序, $U(\mathbf{p}_{i,j,r}, x_{i,j,r}) = \max_{x_{i,j,r}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} \max_{\mathbf{p}_{i,j,r}} H_{i,j,r}$ 成立, 问题 2 即可分解为式(10)中的问题 3 和式(11)中的问题 4, 问题 3 通过优化功率变量 $\mathbf{p}_{i,j,r}$ 最大化 $H_{i,j,r}$, 求解功率最优解 $\mathbf{p}_{i,j,r}^*$ 的 $H_{i,j,r}^* = H_{i,j,r}(\mathbf{p}_{i,j,r}^*) = \mathbf{p}_{i,j,r}^*$, 继而问题 4 进一步联合信道分配和 MR 选择优化 DL 用户的总能效, 解出最优 $x_{i,j,r}^*$ 。证毕

$$\text{问题 3: } \max_{\mathbf{p}_{i,j,r}} H_{i,j,r} \quad \text{s.t. 式(8a); 式(8b)} \quad (10)$$

$$\text{问题 4: } \begin{cases} \max_{x_{i,j,r} \in \{0,1\}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} H_{i,j,r}^* \\ \text{s.t. 式(8c); 式(8d)} \end{cases} \quad (11)$$

3.2 功率控制

问题 3 中, 通过观察 $H_{i,j,r}$ 关于 $\mathbf{p}_{i,j,r}$ 的二阶导数可知, 其为非凸优化问题, 一般意义上属于 NP-hard 难题。但其可转化为 DC 结构, 即两个凸函数的差值, 表示为 $H_{i,j,r} = F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r})$, 其中 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 和 $F_2(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 分别为

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) &= \log_2(p_{i,j,r}^w p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 b_{i,j,r}^1) \\ &\quad + \log_2(p_{i,j,r}^w p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 b_{i,j,r}^2) \\ &\quad - q\varepsilon(p_{i,j,r}^{d1} + p_{i,j,r}^{d2} + p_{i,j,r}^w) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}) &= \log_2(p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 + p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 + p_{i,j,r}^w b_{i,j,r}^1 + 1) \\ &\quad + \log_2(p_{i,j,r}^{d1} a_{i,j,r}^1 + p_{i,j,r}^{d2} a_{i,j,r}^2 + p_{i,j,r}^w b_{i,j,r}^2 + 1) \end{aligned} \quad (13)$$

易知 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 和 $F_2(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 都是关于变量 $\mathbf{p}_{i,j,r}$ 的

凸函数, 因此 $F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}) \leq F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}^k) + \nabla F_2^T(\mathbf{p}_{i,j,r}^k)(\mathbf{p}_{i,j,r} - \mathbf{p}_{i,j,r}^k), \forall \mathbf{p}_{i,j,r}$, 其中 $\nabla F_2^T(\mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 表示在 $\mathbf{p}_{i,j,r} = \mathbf{p}_{i,j,r}^k$ 时, $F_2(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 的梯度向量, k 表示迭代次数。我们令 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k) = F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}^k) - \nabla F_2^T(\mathbf{p}_{i,j,r}^k)(\mathbf{p}_{i,j,r} - \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$, 可知 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}) \geq F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k), \forall \mathbf{p}_{i,j,r}$ (在功率点 $\mathbf{p}_{i,j,r}^k$ 处, $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 是 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r})$ 的下界值), 我们将 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 代替问题 3 中的 $H_{i,j,r}$, 以此求解问题 3 的近似解, 故转化为式(14)中的问题 5, 此过程见 SCO 问题^[16,17]的求解。

可证明 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 随 k 的增加逐渐收敛, 首先, $\mathbf{p}_{i,j,r}^{k+1} = \arg \max_{\mathbf{p}_{i,j,r}} F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$, 故 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}^{k+1}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k) \geq F(\mathbf{p}_{i,j,r}^k, \mathbf{p}_{i,j,r}^k) = F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}^k) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}^k)$, 其次根据 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}) \geq F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k), \forall \mathbf{p}_{i,j,r}$ 得到 $F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}^k) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}^k) \geq F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^{k-1})$, 综上可知, $F(\mathbf{p}_{i,j,r}^{k+1}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k) \geq F(\mathbf{p}_{i,j,r}^k, \mathbf{p}_{i,j,r}^{k-1})$, 故 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 随迭代次数 k 的增加单调非减, 同时 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k) \leq F_1(\mathbf{p}_{i,j,r}) - F_2(\mathbf{p}_{i,j,r}) = H_{i,j,r}$, 根据功率限制条件式(8b)、式(8c)、式(8d)可知 $H_{i,j,r}$ 存在上界, 即 $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 存在上界, 因此, $F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k)$ 随 k 的增加逐渐收敛。

$$\text{问题 5: } \begin{cases} \max_{\mathbf{p}_{i,j,r}} F(\mathbf{p}_{i,j,r}, \mathbf{p}_{i,j,r}^k), \\ \text{s.t. 式(8a); 式(8b)} \end{cases} \quad (14)$$

易知问题 5 是凸优化问题, 可借助凸优化的内点法求解, 此处内点法从略。综上, 问题 3 的算法求解过程如表 2 所示。

表 2 求解 q 给定时间问题 3 的功率近似解

初始化:	设定 φ 为较小的正数, 其大小决定算法的收敛程度, 令 $k=0, \forall \mathbf{p}_{i,j,r}^0 \in \Omega, \Omega$ 为问题 5 的可行域。
步骤 1	计算 $\nabla F_2^T(\mathbf{p}_{i,j,r}^0), \forall i \in C, j \in D, r \in K$;
步骤 2	$k=k+1$, 在 $\mathbf{p}_{i,j,r} = \mathbf{p}_{i,j,r}^{k-1}$ 时使用内点法解决问题 5, 得到 $\mathbf{p}_{i,j,r}$, 并更新 $\nabla F_2^T(\mathbf{p}_{i,j,r}^k)$;
步骤 3	判断若 $ \mathbf{p}_{i,j,r}^k - \mathbf{p}_{i,j,r}^{k-1} < \varphi$ 时算法收敛, 结束, 否则返回步骤 2。

问题 3 通过控制功率变量优化问题 2 中的 $H_{i,j,r}$, 问题 3 为非凸问题, 为方便求解, 将其转化为 DC 结构问题, 并借助 SCO 方法得到有效的近似解 $H_{i,j,r}^*$, 以此求解问题 4。表 2 中求解问题 3 的算法复杂度为 $O(I_S I_{\text{im}})$, 其中, I_S 为求解问题 3 算法的迭代次数, I_{im} 为内点法的算法复杂度。

3.3 联合信道分配与 MR 选择

问题 3 通过功率控制将目标值 $H_{i,j,r}$ 转化为近似最优解 $H_{i,j,r}^*$ 后, 问题 4 在 $H_{i,j,r}^*$ 的基础上求解联合信道分配与 MR 选择的二元变量 $x_{i,j,r}$, 其过程可通过定理 3 描述。

定理 3 在中继节点可被多链路复用的条件下,

问题 4 等价于二分图的最大匹配问题。

证明 问题 4 中, 在中继节点可被多链路复用时, 任意 D2D 对 j 复用信道 i 后的最优中继选择过程为 $r^* = \arg \max_r H_{i,j,r}^*, \forall i \in C, j \in D$, 此时问题 4 的

目标值 $\max_{x_{i,j,r} \in \{0,1\}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{r \in K} x_{i,j,r} H_{i,j,r}^* \triangleq \max_{y_{i,j} \in \{0,1\}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} y_{i,j} H_{i,j}^*$, 其中, $y_{i,j} = 1$ 表示 D2D 对 j 选择信道 i 通信, 其他情况 $y_{i,j} = 0$ 。D2D 对确定最优中继 r^* 后, 问题 4 等价于二分图的最大匹配问题, 可转化为式(15)中的问题 6。

$$\text{问题 6: } \max_{y_{i,j} \in \{0,1\}} \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} y_{i,j} H_{i,j}^* \\ \text{s.t. } \sum_{j \in D} y_{i,j} = 1, \quad \forall i \in C \quad (15a)$$

$$\sum_{i \in C} y_{i,j} = 1, \quad \forall j \in D \quad (15b)$$

式(15a)表示单个 DL 只能复用单个信道, 式(15b)表示单个信道只能被单个 DL 复用, 问题 6 等价于图中二分图最大匹配问题。

证毕

综上, 问题 4 等价于二分图的最大匹配问题, 其可通过匈牙利算法求解, 表 3 给出了问题 4 的具体求解过程, 其中, 匈牙利算法为求解二分图最大匹配问题的最优算法, 故表 3 中联合信道分配与 MR 选择的算法为求解问题 4 的最优算法。

问题 4 求解信道分配与 MR 选择的二元变量 $x_{i,j,r}$, 可先将其转化为二分图的最大匹配问题, 再借助匈牙利算法求解。问题 4 的算法总复杂度为 $O(Q^3 + MNT)$, 其中 $Q = \max\{M, N\}$, 步骤 1 确定最优中继的算法复杂度是 $O(MNT)$, 步骤 2 中匈牙利算法的复杂度是 $O(Q^3)$, 步骤 3 的算法复杂度是 $O(Q)$ 。

3.4 复杂度分析

文中 Dinkelbach 算法为外循环算法, 问题 3 和问题 4 算法为内循环算法, 首先, 将 Dinkelbach 算法的循环次数记为 I_D ; 其次, 问题 3 为单个功率变量 $p_{i,j,r}$ 的求解过程, 对于 MNT 个功率变量, 其总的算法复杂度是 $O(MNT I_S I_{in})$; 最后, 求解问题 4 的算法复杂度为 $O(Q^3 + MNT)$; 故本文算法的总复杂度为 $O(I_D(MNT I_S I_{in} + Q^3 + MNT)) \approx O(I_D(MNT I_S I_{in} + Q^3))$ 。

表 3 联合信道分配与 MR 选择算法

初始化:	根据定理 1 得到最优功率 $p_{i,j,r}^*$, 确定相应的 DL 能效 $H_{i,j,r}^*$ 。
步骤 1	根据公式 $r^* = \arg \max_r H_{i,j,r}^*, \forall i \in C, j \in D$, 选择任意 (i, j) 对应的最优中继 r^* ;
步骤 2	根据 (i, j) 对应的 r^* 确定 2 维矩阵 $\mathbf{H} = [H_{i,j,r^*}^*]_{N \times M}$, 使用匈牙利算法求解 \mathbf{H} 的最优匹配矩阵 $\mathbf{Y} = [y_{i,j}]_{N \times M}$;
步骤 3	若矩阵 \mathbf{Y} 中 $y_{i^*, j^*} = 1$, 根据步骤 1 中 (i^*, j^*) 对应的 r^* , 使 $x_{i^*, j^*, r^*} = 1$, 其他 $x_{i,j,r} = 0$, 确定 3 维匹配矩阵 $\mathbf{X} = [x_{i,j,r}]_{N \times M \times T}$, 结束。

4 仿真结果

假定仿真的单个蜂窝小区是半径为 500 m 的圆形小区, 基站位于小区中心, 所有 CL, DL 和 MR 用户均匀分布在小区内。我们假定小区内 DL 数目 $M=4$, CL 数目 $N=6$, CL 发射功率为 $p_i^c = 23$ dBm, 中继以及 D2D 对的最大功率限制为 $p_{\max}^w = p_{\max}^{d1} = p_{\max}^{d2} = 21$ dBm, 噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz, 资源块带宽 180 kHz, 算法参数 $\rho = \varphi = 0.01$, 式(7)中发射机功率效率的倒数 $\varepsilon = 1.5$, 信干噪比阈值 $\theta_{th}^{c1} = \theta_{th}^{c2} = 0$ dB。

仿真设定的对比算法有: 算法 1 THPM: 文献[18]中算法, 但以 DL 总吞吐量为优化目标值。算法 2 ENPC: 文献[19]中的功率控制算法, 其中算法的外部循环和内部障碍法的迭代次数分别为 I_o, I_b , 信道分配和 MR 选择采用本文算法, 优化 DL 总能效。算法 3 ENCM: 文献[20]中的信道分配与 MR 选择算法, 其中 t 为该算法的迭代次数, 功率控制同本文算法, 优化 DL 总能效。

对比参考算法, 我们分别从算法复杂度和算法的表现性能上说明本文算法相比于参考算法的有效性。

从算法复杂度上看, 参考算法 1、算法 2、算法 3 的算法复杂度分别为 $O(MNT + M \log_2 M)$, $O(I_D(MNT I_o I_b + Q^3))$ 和 $O(I_D(MNT I_S I_{in} + t \max(M, N, T)^3))$, 本文算法的复杂度为 $O(I_D(MNT I_S I_{in} + Q^3))$, 可以看出本文算法复杂度比参考算法 3 小, 但本文算法复杂度要高于参考算法 1。

从算法的表现性能上看, 首先, Dinkelbach 算法迭代次数较少, 例如: 1 次拓扑中, Dinkelbach 算法的 q 随着迭代过程 3 次即可收敛, 3 次收敛过程中 q 分为 $q=0, q=1.210, q=1.322$ 。图 1 观察了链路 j 在通过中继 r 并复用资源 i 下 SCO 机制的收敛性示意图。图 1(a), 1(b), 1(c) 分别对应 $q=0, q=1.210, q=1.322$ 时, 借助 SCO 机制求解问题 3 中解的收敛速度, 此处考虑的是当 DL 链路 1 复用 CL 链路 1 资源且使用 MR1 进行中继传输时, 问题 3 的求解过程。图 1 中虚线为理论最优值¹⁾, 实线为解的收敛情况。其它情况下问题 3 同样具有收敛性, 此处不再赘述。

图 2 是在 500 次拓扑后取平均值的结果, 中继数 $T=8$, 图中观察 p_0 从 10 mW 增加到 110 mW 时, DL 用户性能的变化曲线。图 2(a), 2(b), 2(c) 分别观察的是 DL 用户的总能效, 总吞吐量和总分数功率

¹⁾最优值可通过商业优化工具 AMPL 进行建模, 并借助 BARON 优化方法求解, 详见 <http://ampl.com>

的变化情况, 首先, 分析能效优化与吞吐量优化间的关联性: 由图 2(b)可知, 随着 p_0 的增加, 能效优化公式的分母中 DL 发射功率对总能耗的影响减小, 使得对能效的优化趋向于对吞吐量的优化, 即可见本文算法趋近与参考算法 1, 虽然参考算法 1 的吞吐量性能优于本文算法, 但由图 2(c)可知, 优化吞吐量的参考算法 1 总发射功率明显大于本文算法的总发射功率, 因此图 2(a)中本文算法的能效优于参考算法 1, 提升了 13.47%。

特别地是, 当 $q=0$ 时, 文中算法从优化 DL 用户的总能效退化为最大化 DL 用户的总吞吐量。其次, 分析本文算法通过联合多维资源在优化能效方面的优势: 由图 2(a)可知本文算法的能效性能优于参考算法 2 和参考算法 3, 比参考算法 2 提升了 24.26%, 比参考算法 3 提升了 35.97%, 由图 2(b), 图 2(c)可知本文算法在吞吐量和能耗方面均优于参考算法 2 和参考算法 3, 体现了本文功率控制算法和联合信道分配以及中继选择算法的有效性。

图 3 也是在 500 次拓扑后取平均值的结果, 其中 $p_0 = 10 \text{ mW}$, 为确保单一 DL 至少存在单个 MR, 设定 MR 个数不小于 DL 数目, 故图中观察 MR 从 4 增加到 20 时, DL 用户性能的变化曲线。图 3(a)

观察的是 DL 用户的总能效的变化。首先, 伴随 MR 数目的增加, DL 用户可供选择的 MR 增多。MR 选择增益不断提升, 信道质量差的 MR 被剔除, DL 总能效增加, 曲线上升。其次, 参考算法 1 考虑的是优化 DL 用户的总吞吐量, 可作为本文 $q=0$ 的特例, 其 DL 总能效相比本文算法损失了 23.79%。最后, 本文算法的性能比参考算法 2 提升 25.80%, 比参考算法 3 提升了 37.53%, 同样体现了本文功率控制算法和联合信道分配与中继选择算法的有效性。图 3(b)中观察的是 DL 的总吞吐量的变化, 由图可知, 参考算法 1 以优化吞吐量为目标故性能最优, 本文算法性能仅次于参考算法 1, 但从观察 DL 总发射功率的子图 3(c)中可以看出, 本文算法的能耗要远小于参考算法 1, 因此本文所提的能效优化方案有效地实现了频带利用率与终端能量损耗之间的折中。

5 结束语

本文给出的是一种在 TW-AF 中继模式的 D2D 通信场景下, 联合信道分配、功率控制和 MR 选择最大化 DL 用户的总能效。由于原问题在一般意义下为 NP-hard 难题, 文中将其转化为功率控制子问题和联合信道分配与中继选择子问题求解, 其中,

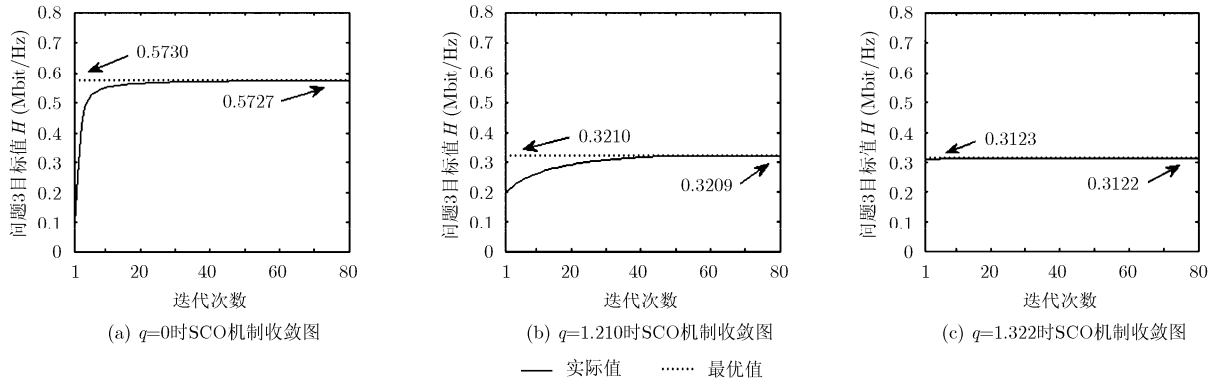


图 1 在单次拓扑下 SCO 机制收敛性示意图

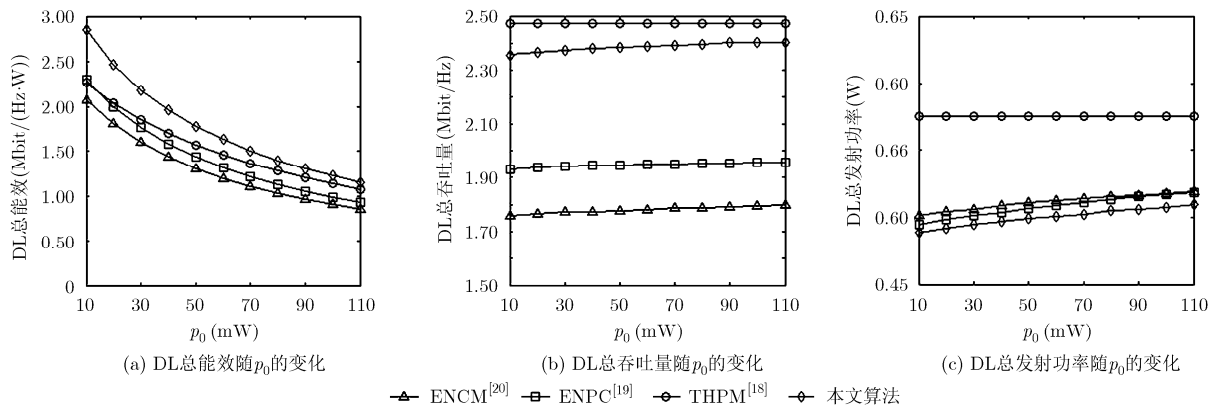
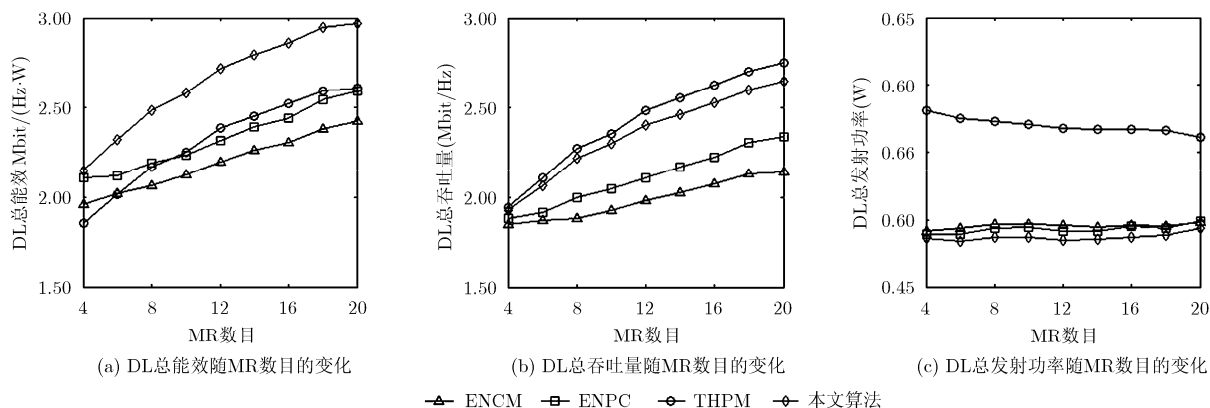


图 2 DL 用户性能随着电路功率 p_0 的变化示意图

图3 DL用户性能随着MR数目 T 的变化示意图

功率控制子问题通过转化为 DC 问题, 借助 SCO 方法求得有效的近似解, 联合信道分配与中继选择子问题通过最优化中继选择转化后借助匈牙利算法得到最优解, 整体算法具有多项式复杂度。仿真结果验证本文能效优化的必要性, 其有效地实现了频带利用率和终端能耗之间的折中。此外, 本文针对功率控制子问题所提出的 SCO 算法具有良好的收敛性, 实现了算法性能和复杂度之间的折中。后续工作可以考虑研究同本文场景类似的 D2D 通信下全双工通信场景以及多跳通信场景。

参考文献

- [1] SEXTON Conor, BODINIER Quentin, FARHANG Arman, *et al.* Coexistence of OFDM and FBMC for underlay D2D communication in 5G networks[C]. IEEE GLOBECOM Workshops, Washington, D.C., USA, 2016: 1-7.
- [2] ZHAO Ming, GU Xinyu, WU Di, *et al.* A two stages relay selection and resource allocation joint method for D2D communication system[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016: 1-6.
- [3] QIAO Jian, SHEN X S, 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. doi: 10.1109/MCOM.2015.7010536.
- [4] LIN Xingqin, ANDREWS J G, GHOSH A, *et al.* An overview of 3GPP device-to-device proximity services[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(4): 40-48. doi: 10.1109/MCOM.2014.6807945.
- [5] SUN Qian, TIAN Lin, ZHOU Yiqing, *et al.* Energy efficient incentive resource allocation in D2D cooperative communications[C]. IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 2632-2637.
- [6] 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): 173-178. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.02.028.
- [7] 朱正仓, 赵季红, 唐睿, 等. 移动中继协助下终端直通中的模式选择和资源分配方案[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10) 111-117. doi: 10.7652/xjtubx201610017.
- [8] SU Zhou, HUI Yilong, and GUO Song. D2D-based content delivery with parked vehicles in vehicular social networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(4): 90-95. doi: 10.1109/MWC.2016.7553031.
- [9] CHITHRA R, BESTAK R, PATRA S K. Hungarian method based joint transmission mode and relay selection in device-to-device communication[C]. IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, Munich, Germany, 2015: 261-268.
- [10] ZHAO Yulei, LI Yong, CHEN Xiang, *et al.* Joint optimization of resource allocation and relay selection for network coding aided device-to-device communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(5): 807-810. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2401557.
- [11] DENG Junquan, DOEHUSZKO A A, FREIJ R, *et al.* Relay selection and resource allocation for D2D-relaying under uplink cellular power control[C]. IEEE Globecom Workshops, San Diego, CA, USA, 2015: 1-6.
- [12] FABIEN H, MUHAMMAD A I, and Rahim T. Joint source and relay energy-efficient resource allocation for two-hop MIMO-AF systems[C]. IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 3806-3811.
- [13] YANG Shuang, CAI Yueming, YANG Wendong, *et al.* Energy efficient resource allocation for OFDM multi-relay cellular

WANG Yuan, ZHAO Jihong, TANG Rui, *et al.* Energy aware resource allocation for underlaid D2D multicast[J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(2): 173-178. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.02.028.

- networks[C]. *Wireless Communications and Signal Processing*, Hefei, China, 2014: 1–6.
- [14] ZHOU Zhenyu, OTA K, DONG Mianxiong, *et al.* Energy-efficient matching for resource allocation in D2D enabled cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, pp(99): 1–13. doi: 10.1109/TVT.2016.2615718.
- [15] YANG Kai, MARTIN S, BOUKHATEM L, *et al.* Energy-efficient resource allocation for device-to-device communications overlaying LTE networks[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference*, Boston, MA, USA, 2015: 1–6.
- [16] BOYD S. Sequential convex programming[OL]. http://stanford.edu/class/ee364b/lectures/seq_slides.pdf, 2016.11.
- [17] TANG Rui, ZHAO Jihong, QU Hua, *et al.* Energy-efficient resource allocation for 5G full-duplex enabled device-to-device communication[C]. *IEEE GLOBECOM Workshops*, Washington, D.C., USA, 2016: 1–7.
- [18] HAN Bin, PENG Mugen, ZHAO Zhongyuan, *et al.* A multidimensional resource-allocation optimization algorithm for the network-coding-based multiple-access relay channels in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(8): 4069–4078. doi: 10.1109/TVT.2013.2251025.
- [19] ZHAO Wentao and WANG Shaowei. Low complexity power allocation for device-to-device communication underlying cellular networks[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Sydney, Australia, 2014: 5532–5537.
- [20] KIM T and DONG Miaomiao. An iterative Hungarian method to joint relay selection and resource allocation for D2D communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(6): 625–628. doi: 10.1109/LWC.2014.2338318.
- 曲 桦: 男, 1961 年生, 教授, 研究方向为移动互联网技术、泛在网技术与应用、网络的管理与控制技术、网络的异构和融合技术.
- 朱正仓: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为 D2D 通信、车联网.
- 赵季红: 女, 1963 年生, 教授, 研究方向为新一代无线移动互联网、泛在网/物联网、异构融合网络、网络虚拟化.
- 唐 睿: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为 D2D 通信、未来 5G 网络.
- 王璐瑶: 女, 1990 年生, 硕士生, 研究方向为 D2D 通信和异构网.
- 曹照鑫: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为毫米波通信和 D2D 通信.