

文章编号:2095-6134(2022)06-0845-08

蜂窝网络下的 SWIPT-D2D 通信资源分配*

杨特,洪佩琳[†],李润洲

(中国科学技术大学 信息网络实验室,合肥 230027)
(2020 年 11 月 6 日收稿;2021 年 1 月 8 日收修改稿)

Yang T, Hong P L, Li R Z. Resource allocation for SWIPT-D2D communication underlying cellular networks[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(6):845-852. DOI:10. 7523/j. ucas. 2021. 0003.

摘 要 无线信息与能量同步传输(SWIPT)作为一种重要的射频能量采集技术,可使能量受限设备在通信的同时采集射频能量补充电能。针对蜂窝网络下的设备到设备(D2D)通信系统,研究 D2D 接收端利用功率切片技术同时进行信息解码与射频能量采集时的资源分配问题。为保证 D2D 接收端在高射频能量采集需求下的高信息解码速率,提出 D2D 通信一对多的频谱复用方案,允许 D2D 设备复用多个蜂窝上行链路频谱进行通信,网络中的所有用户设备作为分布式的射频能量来源对 D2D 接收端充电。在此场景下,对包括频谱匹配,功率控制和功率切片控制在内的系统资源分配进行联合优化,在保证 D2D 接收端射频能量采集需求和各通信链路速率需求条件下最大化 D2D 通信总速率。以上优化问题为非凸形式的混合整数非线性规划(MINLP)问题,难以求得最优解。因此基于贪心思想和凸逼近理论提出两层资源分配算法。仿真结果显示,该算法对比其他资源分配策略,在满足用户设备能量和速率需求前提下显著提升了 D2D 通信总速率。

关键词 D2D 通信;SWIPT;射频能量采集;资源分配

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **DOI:**10. 7523/j. ucas. 2021. 0003

Resource allocation for SWIPT-D2D communication underlying cellular networks

YANG Te, HONG Peilin, LI Runzhou

(Laboratory of Information Network, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract As an important radio frequency energy harvesting technology, simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) enables the energy-limited equipments continuously harvest radio frequency energy without interruption of communication. For the device-to-device (D2D) communication system underlying cellular network, we consider the resource allocation problem when D2D receivers use power-splitting technology to decode information and harvest radio frequency energy simultaneously. In order to ensure the high information decoding rate of D2D receivers under high energy harvesting requirement, we propose a one-to-many spectrum multiplexing scheme for D2D communication. In this scheme, D2D devices are allowed to multiplex multiple cellular uplink

* 国家自然科学基金(61671420)资助
[†] 通信作者, E-mail: plhong@ustc.edu.cn

spectrums for communication, and all user equipments in the network are used as distributed radio frequency energy sources to charge the D2D receivers. In this scenario, the system resource allocation including spectrum matching, power control and power-splitting control is jointly optimized to maximize the sum communication rate of D2D under the condition of ensuring the energy harvesting requirement of D2D receivers and the rate requirement of all communication links. The above optimization problem is a non-convex Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) problem, which is difficult to obtain the optimal solution. Therefore, we propose a two-layer resource allocation algorithm based on greedy thought and convex approximation theory. Simulation results show that compared with other resource allocation strategies, the proposed algorithm can significantly improve the sum rate of D2D communication under the premise of meeting the energy and communication rate requirements of user equipments.

Keywords D2D communication; SWIPT; radio frequency energy harvesting; resource allocation

面对第 5 代(fifth generation, 5G)移动通信场景中智能终端和多媒体应用的爆发式增长,传统蜂窝网络已无法支持海量的设备接入和 10 Gbit/s 以上的高速数据传输^[1]。D2D 通信是 LTE-A 为卸载蜂窝基站流量而提出的设备间直接通信模式,它允许短距离通信设备复用蜂窝频谱直接建立本地连接,以此对蜂窝通信进行补充,实现超高数量的终端连接、更高的频谱效率和更大的系统吞吐量^[2-4]。D2D 终端各种形式的能量采集为 D2D 设备的绿色通信和灵活部署提供了有效方案。其中射频能量采集 D2D 通信受到广泛关注,它利用空间内丰富的射频信号为 D2D 设备充电,实现了 D2D 通信的可持续性^[5]。

文献[6-7]研究传统射频能量采集 D2D 通信,考虑采集射频信号中的能量解决 D2D 发射端能量受限问题。文献[6]提出一种新的认知 D2D 通信模型,该模型中 D2D 发射端对干扰射频能量进行采集并完成数据传输,作者利用随机几何理论分析了两种蜂窝信道接入策略对能量采集 D2D 通信中断概率的影响。文献[7]提出能量站(power beacons, PBs)概念,D2D 发射端先收集已部署 PBs 的射频能量,再复用蜂窝频谱资源进行数据传输,分析了不同能量传输模型下的射频能量采集中断概率和 D2D 保密中断概率。除了面向 D2D 发射端,射频能量采集技术同样可对能量受限的 D2D 接收端充电,以满足其后续的数据传输需求或信号处理需求。

文献[8-9]研究无线信息与能量同步传输(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)的基本原理,该技术允许射频信号同时传输能量和信息。SWIPT 主要包含功率

切片和时间转换两种模式:功率切片模式允许射频接收机将射频信号切分为两部分,一部分用于信息解码,另一部分用于能量采集;时间转换模式允许射频接收机在时间上先进行射频能量采集,再进行信息解码。尽管射频能量采集的能量转化效率不高,但 D2D 设备的发射功率需求一般较低,这使 SWIPT-D2D 的研究具有一定意义。因此,将 SWIPT 应用到 D2D 通信是一种解决 D2D 接收端能量受限并维持高速数据传输的有效解决方案。

文献[10-12]对 SWIPT-D2D 通信的功率控制和功率切片控制(或时间转换控制)问题进行了探索。文献[10]研究支持 SWIPT 的蜂窝系统中具有部分信道状态信息的 D2D 通信功率控制问题,其中蜂窝用户具有功率切片能力,在保证蜂窝用户能量采集需求和速率需求条件下,最大化 D2D 通信速率。文献[11]考虑蜂窝用户与 D2D 用户采用时间转换模式的 SWIPT 进行射频能量采集和信息解码,并为解决功率控制和时间转换控制联合优化问题提出两种策略。文献[12]假设备功率切片设备的 D2D 用户提前确定好复用的蜂窝频谱,据此建立全新的博弈模型,每个 D2D 链路同时选择发射功率和功率切片因子,以使其效用最大化。

除上述资源分配问题,如何通过信道分配和模式选择提升 SWIPT-D2D 系统的能效也被广泛研究。文献[13]利用随机几何理论对系统进行建模,考虑 D2D 用户具备射频能量采集能力(功率切片和时间转换两种模式),分析 D2D 用户复用蜂窝频谱模式,D2D 专用频谱模式以及蜂窝模式下的能效,为提升 D2D 通信能效提供了先进的

模式选择机制,同时证明了 SWIPT 可以增大 D2D 通信的能效。文献[14]考虑 D2D 用户复用蜂窝下行链路频谱,所有用户均配备功率切片设备,基于匹配理论完成了用户的信道分配和功率控制,仿真表明所提算法显著提升了 D2D 用户能效和蜂窝用户的射频能量采集量。

大量文献研究了 SWIPT-D2D 通信系统中的资源分配问题^[10-14],但尚无文献考虑对频谱匹配、功率控制和功率切片控制的联合优化。另外,现有文献均考虑 D2D 设备复用单个蜂窝频谱资源,并从复用频谱中进行射频能量采集,不能同时满足 D2D 设备高的射频能量采集需求和高数据传输需求。本文提出一对多的频谱复用方案,即单个 D2D 对复用多个蜂窝上行链路频谱通信,同时网络中的所有用户和设备作为分布式的射频能量来源对 D2D 接收端充电,即 D2D 接收端可采集全频段射频能量。针对以上场景提出的联合优化问题为非凸形式的混合整数非线性规划 (mixed-integer nonlinear programming problem, MINLP) 问题,难以用多项式时间算法获得最优解^[15]。本文基于贪心思想和凸逼近理论提出两层资源分配算法对该优化问题进行求解。

1 系统模型

如图 1 所示,单小区上行链路蜂窝网络中随机分布 N_D 个 D2D 对 ($D2D_i, i \in \Psi_D = \{1, 2, \dots, N_D\}$) 与 N_C 个蜂窝用户 ($CUE_j, j \in \Psi_C = \{1, 2, \dots, N_C\}$), 蜂窝用户数量远大于 D2D 对数量,基站位于小区中心。假设系统中的所有设备均配备单个全向天线,蜂窝用户利用相互正交的频谱向基站发送数据,D2D 对复用蜂窝上行链路频谱资源进行通信。考虑 D2D 接收端为能量受限设备且具备射频能量采集能力,D2D_i 接收端通过功率切片设备将接收到的全部射频信号按比例切分为两部分: $\rho_{i,I}$ ($0 < \rho_{i,I} < 1$) 部分用于信息解码; $\rho_{i,E}$ ($0 < \rho_{i,E} < 1$) 部分用于射频能量采集,且 $\rho_{i,I} + \rho_{i,E} = 1$ 。为同时满足 D2D 接收端高射频能量采集需求和高数据传输速率,允许单个 D2D 链路复用多个蜂窝上行链路频谱通信。为减小 D2D 对之间的同频干扰,每个蜂窝上行链路频谱最多只能被一个 D2D 链路复用。本文假设基站能够获得蜂窝小区范围内的所有信道状态信息。

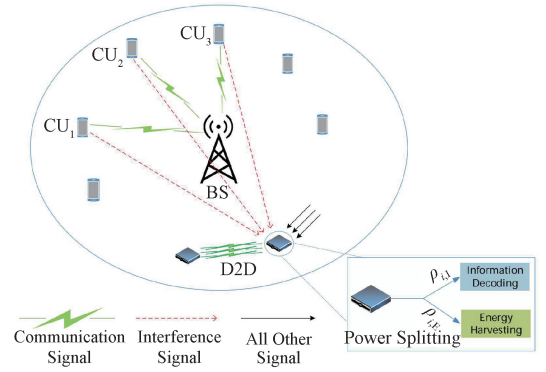


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

2 问题描述与求解

2.1 问题描述

本文考虑 D2D 链路复用蜂窝上行链路频谱,与复用蜂窝下行链路频谱相比,复用蜂窝上行链路频谱时 D2D 接收端将收到更小的蜂窝同频干扰。参考 D2D 通信的相关研究^[5,14],本文忽略频率选择性衰落,假设 D2D 链路的小尺度衰落与复用哪些蜂窝上行链路频谱无关。因此 D2D 链路和蜂窝用户的传输速率可由香农公式表示为

$$R_{d,i} = \sum_{j=1}^{N_C} x_{i,j} \log \left(1 + \frac{\rho_{i,I} p_{i,j} g_i}{\rho_{i,I} p_j g_{j,i} + n_s} \right), \quad (1)$$

$$R_{c,j} = \log \left(1 + \frac{p_j g_j}{\sum_{i=1}^{N_D} x_{i,j} p_{i,j} g_{i,j} + n_s} \right). \quad (2)$$

其中:0~1 变量 $x_{i,j} \in \{0, 1\}$ 表示 D2D 链路 D2D_i 是否复用蜂窝用户 CUE_j 的频谱, $x_{i,j} = 1$ 表示复用, $x_{i,j} = 0$ 表示不复用, 且单个 D2D 链路可复用多个蜂窝上行链路频谱; $p_{i,j}$ 表示 D2D_i 复用 CUE_j 所占用频谱的发射功率, p_j 表示 CUE_j 的发射功率; g_i 和 g_j 分别表示 D2D 链路和蜂窝上行链路的信道增益,包括路径损耗和小尺度瑞利衰落; $\rho_{i,I}$ 为功率切片因子,表示 D2D_i 接收端将 $\rho_{i,I}$ 比例的射频信号用于信息解码; n_s 表示信号处理噪声,由于信号处理噪声远大于天线噪声,因此表达式中忽略天线噪声; $g_{j,i}$ 和 $g_{i,j}$ 分别表示 CUE_j 和 D2D_i 发射端对 D2D_i 接收端和基站的干扰信道增益。

D2D 接收端为能量受限设备且具备射频能量采集能力,因此 D2D_i 接收端利用功率切片设备将全部射频信号的 $\rho_{i,E}$ 比例用于射频能量采集, D2D_i 接收端采集到的射频能量可表示为

$$E_{d,i} = \eta p_{i,E} \left(\sum_{j=1}^{N_C} x_{i,j} p_{i,j} g_i + \sum_{\substack{s \neq i \\ s \in \Psi_D}} \sum_{j=1}^{N_C} x_{s,j} p_{s,j} g_{s,i} + \sum_{j=1}^{N_C} p_j g_{j,i} \right). \quad (3)$$

其中: η 表示射频信号转化为电池能量的效率; 0-1 变量 $x_{s,j} \in \{0, 1\}$ 表示 D2D _{$s(s \neq i)$} 是否复用 CUE _{j} 的频谱; $p_{s,j}$ 表示 D2D _{$s(s \neq i)$} 在 CUE _{j} 占用频谱上的发射功率; $g_{s,i}$ 表示 D2D _{$s(s \neq i)$} 发射端到 D2D _{i} 接收端的信道增益。

多用户蜂窝网络中的 SWIPT-D2D 通信资源分配优化问题(P1)建立如下

$$P1: \max_{X_{i,j}, v(\rho_{i,l}), v(\rho_{i,E}), P_{i,j}, P_j} \sum_{i=1}^{N_D} R_{d,i}, \quad (4a)$$

$$\text{s. t. } R_{d,i} \geq R_d^{\text{th}}, \forall i \in \Psi_D, \quad (4b)$$

$$\log \left(1 + \frac{\rho_{i,l} p_{i,j} g_i}{\rho_{i,l} p_j g_{j,i} + n_s} \right) \geq R_{d,k}^{\text{th}}, \quad (4c)$$

$$E_{d,i} \geq E_d^{\text{th}}, \forall i \in \Psi_D, \quad (4d)$$

$$R_{c,j} \geq R_c^{\text{th}}, \forall j \in \Psi_C, \quad (4e)$$

$$0 \leq \rho_{i,l} \leq 1, 0 \leq \rho_{i,E} \leq 1, \rho_{i,l} + \rho_{i,E} \leq 1, \quad (4f)$$

$$0 \leq p_j \leq p_c^{\text{max}}, \forall j \in \Psi_C, 0 \leq \sum_{j=1}^{N_C} p_{i,j} \leq p_d^{\text{max}}, \quad (4g)$$

$$\sum_{i=1}^{N_D} x_{i,j} \leq 1, x_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall j \in \Psi_C. \quad (4h)$$

其中(4a)为目标函数,表示 D2D 链路总速率,变量 $X_{i,j}, v(\rho_{i,l}), v(\rho_{i,E}), P_{i,j}, P_j$ 为优化变量的向量表达形式;约束(4b)和(4e)为 D2D 对和蜂窝用户的最小速率约束;D2D 对可复用多个蜂窝上行链路频谱,因此约束(4c)为 D2D 对通信子链路的最小速率约束;约束(4d)为 D2D 接收端的最小射频能量采集需求;约束(4f)为功率切片因子限制;约束(4g)表示 D2D 发射端和蜂窝用户的发射功率限制;(4h)为频谱复用约束,表示每个蜂窝上行链路频谱最多只能被一个 D2D 对复用。

2.2 问题求解

优化问题(P1)中包含整数变量 $X_{i,j}$ 和连续变量 $(v(\rho_{i,l}), v(\rho_{i,E}), P_{i,j}, P_j)$, 同时目标函数与部分约束条件为非凸的 log 形式,因此(P1)为非凸形式的 MINLP 问题,难以求得最优解。本文提出两层资源分配算法:贪心比较资源分配 (greedy-comparison resource allocation, GCRA) 算法和基于连续凸逼近的外逼近 (successive

convex approximation-outer approximation, SCA-OA) 算法。GCRA 算法确定 D2D 对复用蜂窝上行链路频谱的数量;SCA-OA 通过连续凸逼近将优化问题(P1)松弛为凸形式的 MINLP,通过外部逼近将其分解为凸形式的非线性规划 (nonlinear programming, NLP) 问题和混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 问题^[16]。

GCRA 算法通过贪心策略,逐个将频谱资源分配给增加复用数量蜂窝频谱能够使 D2D 总速率提升最多的 D2D 链路,直至 D2D 总速率不再增加或网络中没有剩余的频谱资源。分配频谱资源时,只考虑频谱资源的数量,无需考虑具体复用哪些蜂窝频谱。算法流程如表 1 所示。

其中, M_i 表示 D2D _{i} 复用蜂窝频谱的个数; $Y = [M_1, M_2, \dots, M_{N_D}]$ 表示资源分配方案; $R_{d,\text{sum}}(Y)$ 表示 Y 条件下的 D2D 总速率; $\Delta R_{d,\text{sum}}(M_i, M_i + 1)$ 表示 D2D _{i} 复用蜂窝频谱数量由 M_i 增加到 $M_i + 1$ 后 D2D 总速率的变化。

GCRA 算法确定了每个 D2D 对复用蜂窝上行链路频谱的个数,因此 D2D _{i} 的第 k 个子通信子链路的传输速率表示为

表 1 贪心比较资源分配算法

Table 1 Greedy-comparison resource allocation algorithm
算法 1 GCRA 算法
1. Initialization : Set $M_i = 1$ for D2D _{i} ($\forall i \in \Psi_D$); 2. while $R_{d,\text{sum}}(Y)$ is infeasible do 3. Calculate $R_{d,\text{sum}}(Y)$ without D2D rate constraint; 4. for each D2D _{i} do 5. if $R_{d,i} < R_d^{\text{th}}$ then 6. $M_i = M_i + 1, i = i + 1$; 7. else $i = i + 1$; 8. end for 9. return $Y = [M_1, M_2, \dots, M_{N_D}]$; 10. end 11. do 12. Set $\Phi_D = \emptyset$; 13. Calculate $R_{d,\text{sum}}(Y)$, record the maximum $R_{d,i}$ under 14. different M into Φ_D (i. e. if $M_1 = M_4 = M_{12} = 3$ and 15. $R_{d,4} > R_{d,1} > R_{d,12}$, record $R_{d,4}$); 16. for each D2D _{i} in Φ_D do 17. Calculate $\Delta R_{d,\text{sum}}(M_i, M_i + 1)$, where 18. $\Delta R_{d,\text{sum}}(M_i, M_i + 1) = R_{d,\text{sum}}(Y \setminus M_i, M_i + 1) - R_{d,\text{sum}}(Y)$; 19. end for 20. $i^* = \operatorname{argmax}_i \Delta R_{d,\text{sum}}(M_i, M_i + 1)$, $M_{i^*} = M_{i^*} + 1$; 21. return $Y = [M_1, M_2, \dots, M_{N_D}]$; 22. while $R_{d,\text{sum}}(Y)$ is increasing;

$$R_{d,i,k} = \log \left(1 + \frac{\rho_{i,l} p_{i,k} g_i}{\sum_{j=1}^{N_C} x_{i,k,j} \rho_{i,l} p_{j,j} g_{j,i} + n_s} \right). \quad (5)$$

D2D_i 的传输速率和 D2D 总速率分别表示为

$$R_{d,i} = \sum_{k=1}^{M_i} R_{d,i,k}, \quad (6)$$

$$R_{d,\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{M_i} R_{d,i,k}. \quad (7)$$

CUE_j 的传输速率和 D2D_i 的射频能量采集表示为

$$R_{c,j} = \log \left(1 + \frac{p_j g_j}{\sum_{i=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{M_i} x_{i,k,j} p_{i,k} g_{i,j} + n_s} \right), \quad (8)$$

$$E_{d,i} = \eta \rho_{i,E} \left(\sum_{k=1}^{M_i} p_{i,k} g_i + \sum_{\substack{s \neq i \\ s \in \Psi_D}} \sum_{k=1}^{M_s} p_{s,k} g_{s,i} + \sum_{j=1}^{N_C} p_j g_{j,i} \right). \quad (9)$$

其中: 0-1 变量 $x_{i,k,j} \in \{0,1\}$ 表示 D2D_i 的第 k 个子通信链路是否复用 CUE_j 的频谱; $p_{i,k}$ 和 $p_{s,k}$ 分别表示 D2D_i 和 D2D_{s(s \neq i)} 在第 k 个子通信链路上的发射功率; M_i 和 M_s 分别表示 D2D_i 和 D2D_{s(s \neq i)} 复用蜂窝频谱的个数。根据式(5)~式(9)原始优化问题(P1)转化为优化问题(P2)

$$\text{P2: } \max_{x_{i,k,j}, v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), p_{i,k}, p_j} R_{d,\text{sum}}, \quad (10a)$$

$$\text{s. t. (4b), (4d) ~ (4f),} \quad (10b)$$

$$R_{d,i,k} \geq R_{d,k}^{\text{th}}, \forall i \in \Psi_D, \forall k \in M_i, \quad (10c)$$

$$0 \leq p_j \leq p_c^{\max}, \forall j \in \Psi_C,$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^{M_i} p_{i,k} \leq p_d^{\max}, \forall i \in \Psi_D, \quad (10d)$$

$$\sum_{i=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{M_i} x_{i,k,j} \leq 1, x_{i,k,j} \in \{0, 1\}, \forall j \in \Psi_C. \quad (10e)$$

由于(P2)为非凸形式,通过变量替换和连续凸逼近对(P2)进行凸松弛。首先进行变量替换,令 $p_{i,k} = e^{\hat{p}_{i,k}}, p_j = e^{\hat{p}_j}, \rho_{i,l} = e^{\hat{\rho}_{i,l}}, \rho_{i,E} = e^{\hat{\rho}_{i,E}}$ 。由于变量替换后的问题仍为非凸问题,可用下式获得 log 函数紧下界^[17]

$$\alpha \log(z_0) + \beta \leq \log(1 + z_0). \quad (11)$$

在满足如下条件时,式(11)在 $z = z_0$ 时等号成立

$$\begin{cases} \alpha = \frac{z_0}{(1 + z_0)}, \\ \beta = \log(1 + z_0) - \alpha \log(z_0). \end{cases} \quad (12)$$

D2D_i 第 k 个子通信链路传输速率可表示为

$$R_{d,i,k} = \alpha_{d,i,k} (\log(g_i) + \hat{\rho}_{i,l} + \hat{p}_{i,k} -$$

$$(\log(\sum_{j=1}^{N_C} x_{i,k,j} e^{\hat{\rho}_{i,l} + \hat{p}_j} g_{j,i} + n_s))) + \beta_{d,i,k}. \quad (13)$$

CUE_j 的传输速率可表示为

$$R_{c,j} = \alpha_{c,j} (\log(g_j) + \hat{p}_j - (\log(\sum_{i=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{M_i} x_{i,k,j} e^{\hat{\rho}_{i,k}} g_{i,j} + n_s))) + \beta_{c,j}. \quad (14)$$

优化问题(P2)经变量替换后,射频能量采集约束仍为非凸约束,对其在 $(v(\hat{\rho}_{i,l}^*), v(\hat{\rho}_{i,E}^*), \hat{P}_{i,k}^*, \hat{P}_j^*)$ 处进行一阶泰勒展开。本文为方便表示,用符号 $(v(\hat{\rho}), \hat{P})$ 代替 $(v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j)$, 得到线性表达式

$$E_{d,i} = E_{d,i}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*) + \nabla E_{d,i}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*)^T \times (v(\hat{\rho}) - v(\hat{\rho}^*), \hat{P} - \hat{P}^*). \quad (15)$$

外部逼近算法将经过以上变换的优化问题(P2)分解为 NLP 问题和 MILP 问题。当 0~1 变量 $X_{i,k,j}$ 固定为 $X_{i,k,j}^\xi$ 时,由式(6)、式(7)、式(13)~式(15)得到凸形式的 NLP 优化问题(P2.1)

P2.1:

$$\begin{aligned} \min_{v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j, X_{i,k,j}^\xi} & -R_{d,\text{sum}}(v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j, X_{i,k,j}^\xi), \\ & \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j, X_{i,k,j}^\xi \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\text{s. t. (4b), (4d), (4e), (10c),} \quad (16b)$$

$$e^{\hat{\rho}_{i,l}} \leq 1, e^{\hat{\rho}_{i,E}} \leq 1, e^{\hat{\rho}_{i,l}} + e^{\hat{\rho}_{i,E}} \leq 1, \forall i \in \Psi_D, \quad (16c)$$

$$e^{\hat{p}_j} \leq p_c^{\max}, \forall j \in \Psi_C, \sum_{k=1}^{M_i} e^{\hat{p}_{i,k}} \leq p_d^{\max}, \forall i \in \Psi_D. \quad (16d)$$

根据优化问题(P2.1)得到的解和式(15)得到 MILP 优化问题(P2.2)

$$\text{P2.2: } \min_{x_{i,k,j}, v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j, \theta} \theta, \quad (17a)$$

$$\text{s. t. (4d), (10e), } e^{\hat{p}_j} \leq p_c^{\max}, \forall j \in \Psi_C, \quad (17b)$$

$$f_1(\hat{P}^*) + \nabla f_1(\hat{P}^*)^T \times (\hat{P} - \hat{P}^*) \leq 0, \forall i \in \Psi_D, \quad (17c)$$

$$\begin{aligned} & f_2(v(\hat{\rho}^*)) + \nabla f_2(v(\hat{\rho}^*))^T \times \\ & (v(\hat{\rho}) - v(\hat{\rho}^*)) \leq 0, \forall i \in \Psi_D, \quad (17d) \\ & -R_{d,\text{sum}}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi) - \\ & \nabla R_{d,\text{sum}}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi)^T \times \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} v(\hat{\rho}) - v(\hat{\rho}^*) \\ \hat{P} - \hat{P}^* \\ X - X^\xi \end{pmatrix} - \theta \leq 0, \quad (17e)$$

$$\begin{aligned} & R_d^{\text{th}} - R_{d,i}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi) - \\ & \nabla R_{d,i}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi)^T \times \\ & \begin{pmatrix} v(\hat{\rho}) - v(\hat{\rho}^*) \\ \hat{P} - \hat{P}^* \\ X - X^\xi \end{pmatrix} \leq 0, \forall i \in \Psi_D, \quad (17f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & R_{d,k}^{\text{th}} - R_{d,i,k}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi) - \\ & \nabla R_{d,i,k}(v(\hat{\rho}^*), \hat{P}^*, X^\xi)^T \times \\ & \begin{pmatrix} v(\hat{\rho}) - v(\hat{\rho}^*) \\ \hat{P} - \hat{P}^* \\ X - X^\xi \end{pmatrix} \leq 0, \forall i \in \Psi_D, \forall k \in M_i, \quad (17g) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & R_c^{\text{th}} - R_{c,j}(\hat{P}^*, X^\xi) - \nabla R_{c,j}(\hat{P}^*, X^\xi)^T \times \\ & \begin{pmatrix} \hat{P} - \hat{P}^* \\ X - X^\xi \end{pmatrix} \leq 0, \forall j \in \Psi_C. \quad (17h) \end{aligned}$$

为方便表示,优化问题(P2.2)中用符号 $(v(\hat{\rho}), \hat{P}, X)$ 代替 $(v(\hat{\rho}_{i,l}), v(\hat{\rho}_{i,E}), \hat{P}_{i,k}, \hat{P}_j, X_{i,k,j})$;约束(17c)和(17d)分别对应(16d)和(16c)的一阶泰勒展开;外部逼近算法步骤如表2所示。

表 2 外部逼近算法

Table 2 Approximation-outer approximation algorithm	
算法 2 OA 算法	
1.	Initialization: Set $\varepsilon = 10^{-1}, \Delta f = 1$, fix $X_{i,k,j}$ as $X_{i,k,j}^\xi$;
2.	while $\Delta f = \text{abs}(f_{\text{NLP}} - f_{\text{MILP}}) > \varepsilon$ do
3.	Solving the NLP problem (P2.1) under fixed $X_{i,k,j}^\xi$, get
4.	the solution $(v(\hat{\rho}_{i,l}^*), v(\hat{\rho}_{i,E}^*), \hat{P}_{i,k}^*, \hat{P}_j^*)$, the objective value
5.	is $f_{\text{NLP}} = -R_{d,\text{sum}}(v(\hat{\rho}_{i,l}^*), v(\hat{\rho}_{i,E}^*), \hat{P}_{i,k}^*, \hat{P}_j^*, X_{i,k,j}^\xi)$;
6.	Solving the MILP problem (P2.2), get the new solution
7.	$(v(\hat{\rho}_{i,l}^\xi), v(\hat{\rho}_{i,E}^\xi), \hat{P}_{i,k}^\xi, \hat{P}_j^\xi, X_{i,k,j}^\xi)$, the objective function
8.	value is $f_{\text{MILP}} = \theta$;
9.	end
10.	obtain solution $(v(\hat{\rho}_{i,l}^\xi), v(\hat{\rho}_{i,E}^\xi), \hat{P}_{i,k}^\xi, \hat{P}_j^\xi, X_{i,k,j}^\xi)$;

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

考虑半径为 200 m 的单小区蜂窝网络,基站位于小区的 中心,SWIPT-D2D 设备和蜂窝用户理想均匀的分布在小区内部。表 3 给出了仿真参数

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters	
参数	数值
蜂窝半径 R/m	200
路径损耗参数 α	$\leq 50\text{ m}; 2.5, > 50\text{ m}; 3$
通信带宽 B_w/kHz	180
信号处理噪声密度 n_s/dBm	-47
能量转化效率 η	0.8
CUE 最小传输速率 $R_c^{\text{th}}/(\text{Mbit/s})$	0.2
D2D 最小传输速率 $R_d^{\text{th}}/(\text{Mbit/s})$	[0.6, 1, 1.4]
D2D 子链最小传输速率 $R_{d,k}^{\text{th}}/(\text{Mbit/s})$	0.3
D2D 射频能量采集需求 $E_d^{\text{th}}/\text{mW}$	[2.5, 3.5]
CUE 最大发射功率 $p_c^{\text{max}}/\text{mW}$	400
D2D 最大发射功率 $p_d^{\text{max}}/\text{mW}$	50
D2D 最大通信范围 dist/m	30~50

设置^[2,18]。

3.2 仿真结果与分析

为验证所提方案与算法的性能,选择以下资源分配策略和算法进行对比:D2D 通信一对一频谱匹配策略;D2D 接收端分配相同功率切片因子策略;基于优先级的序列算法^[19](priority-based sequential algorithm, PBSA)。

图 2(a) 和 2(b) 分别为低 D2D 通信速率需求(0.6 Mbit/s)和高 D2D 通信速率需求(1.4 Mbit/s)时,D2D 接收端射频能量采集需求对 D2D 平均速率的影响。由图 2 可知,在所有资源分配策略与算法中,随着 D2D 接收端射频能量采集需求增高,D2D 平均速率逐渐降低,且下降趋势越来越快。这是由于基站对 D2D 接收端功率切片的控制,将射频信号中更高的比例 $\rho_{i,E}$ 用于能量采集,更少的比例 $\rho_{i,l}$ 用于信息解码,导致 D2D 平均速率逐渐减小;同时随着 D2D 射频能量采集需求变高,射频能量主要来源蜂窝用户的发射功率变大,D2D 设备的受到的同频干扰增大,平均速率下降。随着 $\rho_{i,l}$ 的减小,信号处理噪声 n_s 对 D2D 速率的影响越来越明显,因此 D2D 平均速率下降速度随 D2D 射频能量采集需求增高而变快。

在传统一对一频谱匹配策略中,当 D2D 通信速率需求较低时(0.6 Mbit/s),如图 2(a) 中所示,D2D 设备能够满足低能量需求下的信息传输,但 D2D 平均速率较低;当 D2D 通信速率需求变高时(1.4 Mbit/s),如图 2(b) 所示,D2D 平均速率无法达到 D2D 最小速率需求。本文所提算法,在低 D2D 通信速率需求下(0.6 Mbit/s)能够满足高

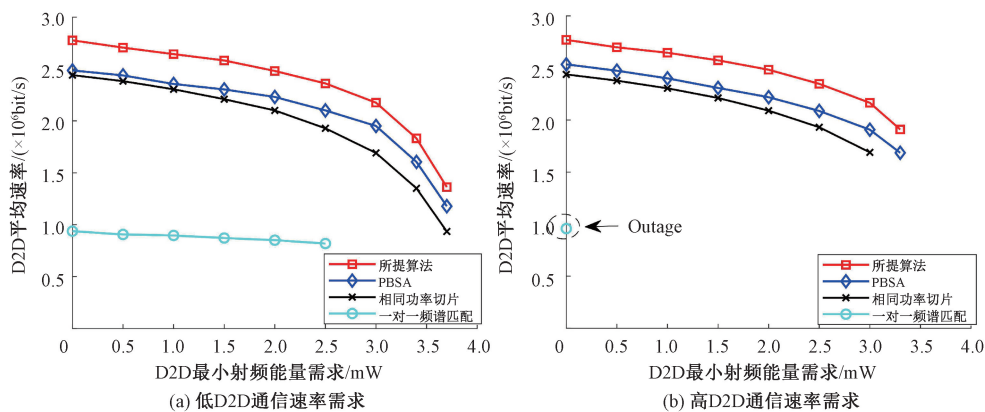


图 2 D2D 射频能量采集需求与 D2D 平均速率关系

Fig. 2 D2D radio frequency energy harvesting requirement versus D2D average rate

能量采集需求,当 D2D 通信速率需求达到 1.4 Mbit/s 时,仍可满足 3 mW 以上的能量采集需求。综合可知,所提算法能够使 D2D 接收端在高射频能量采集需求下维持高的信息解码速率。与相同功率切片策略相比,所提算法在提升 D2D 平均速率方面效果显著,这是由于在多用户网络中,每个 D2D 对的信道质量和射频能量采集能力不同,为所有 D2D 接收端分配相同功率切片系数会降低 D2D 最优传输速率。在相同射频能量采集需求下,所提算法比 PBSA 得到的 D2D 平均速率更高,原因是 PBSA 在频谱分配过程中是静态的,且分配过程仅保证每个 D2D 对速率的局部最优,所提算法能够保证分配每个频谱资源时,都能使 D2D 通信的总速率提升最大,考虑了全局最优。

图 3 为系统中蜂窝用户数量对 D2D 平均速率的影响。所提算法与 PBSA 在不同射频能量采集需求下的 D2D 平均速率都随蜂窝用户数量的

增加逐渐增大。原因是,随着蜂窝用户数量的增加,D2D 对之间的频谱资源竞争降低,D2D 对可分配到同频干扰更低,数量更多的蜂窝频谱资源进行通信。

同时,蜂窝用户的发射功率较 D2D 发射端更大,蜂窝用户数量的增加,使得 D2D 接收端可得到的射频能量来源更加充足。因此使得在相同射频能量采集需求下,D2D 平均速率随蜂窝用户数量的增加逐渐增大。

4 结束语

本文研究蜂窝网络下的 SWIPT-D2D 通信的资源分配问题。针对当前 D2D 通信一对一频谱复用策略无法满足 D2D 接收端高射频能量采集需求和高数据传输需求的现状,提出一对多的频谱复用方案,允许 D2D 接收端采集全频段射频能量,充分利用射频资源。提出两层资源分配算法 GCRA 和 SCA-OA 解决提出的非凸形式的 MINLP 问题。仿真表明,所提算法与其他资源分配策略相比,在满足用户设备能量和速率需求条件下显著提升了 D2D 通信总速率。

参考文献

[1] Wang C X, Haider F, Gao X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736752.

[2] Li R Z, Hong P L, Xue K P, et al. Energy-efficient resource allocation for high-rate underlay D2D communications with statistical CSI: a one-to-many strategy[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4006-4018. DOI: 10.1109/TVT.2020.2973228.

[3] Sawyer N, Smith D B. Flexible resource allocation in device-

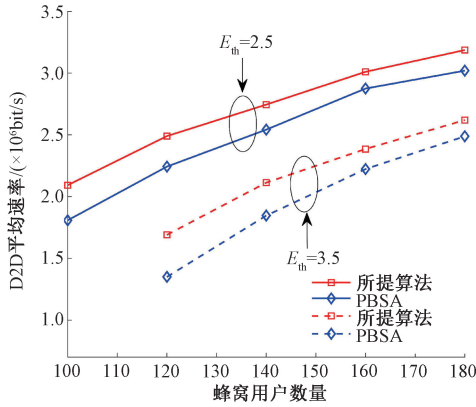


图 3 蜂窝用户数量与 D2D 平均速率关系
($R_d^{\text{th}} = 1 \text{ Mbit/s}$)

Fig. 3 Number of cellular users versus D2D average rate($R_d^{\text{th}} = 1 \text{ Mbit/s}$)

- to-device communications using stackelberg game theory[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 653-667. DOI:10.1109/TCOMM.2018.2873344.
- [4] 李维谦, 邱玲. 支持 D2D 多播的蜂窝网络分簇策略与资源分配[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(1): 137-143. DOI:10.7523/j.issn.2095-6134.2019.01.019.
- [5] Luo Y, Hong P L, Su R L, et al. Resource allocation for energy harvesting-powered D2D communication underlaying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 10486-10498. DOI:10.1109/TVT.2017.2727144.
- [6] Sakr A H, Hossain E. Cognitive and energy harvesting-based D2D communication in cellular networks: stochastic geometry modeling and analysis [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1867-1880. DOI:10.1109/TCOMM.2015.2411266.
- [7] Liu Y W, Wang L F, Raza Zaidi S A, et al. Secure D2D communication in large-scale cognitive cellular networks: a wireless power transfer model [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1): 329-342. DOI:10.1109/TCOMM.2015.2498171.
- [8] Ponnimbaduge Perera T D, Jayakody D N K, Sharma S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): recent advances and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 264-302. DOI:10.1109/COMST.2017.2783901.
- [9] Lu X, Wang P, Niyato D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789. DOI:10.1109/COMST.2014.2368999.
- [10] Lim D W, Kang J, Kim H M. Adaptive power control for D2D communications in downlink SWIPT networks with partial CSI [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(5): 1333-1336. DOI:10.1109/LWC.2019.2916352.
- [11] Lim D W, Kang J, Chun C J, et al. Joint transmit power and time-switching control for device-to-device communications in SWIPT cellular networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 322-325. DOI:10.1109/LCOMM.2018.2883432.
- [12] Huang J, Xing C C, Guizani M. Power allocation for D2D communications with SWIPT [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4): 2308-2320. DOI:10.1109/TWC.2019.2963833.
- [13] Huang J, Cui J J, Xing C C, et al. Energy-efficient SWIPT-empowered D2D mode selection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3903-3915. DOI:10.1109/TVT.2020.2970235.
- [14] Zhou Z Y, Gao C X, Xu C, et al. Energy-efficient stable matching for resource allocation in energy harvesting-based device-to-device communications[J]. IEEE Access, 2017, 5: 15184-15196. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2678508.
- [15] Palomar D P, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8): 1439-1451. DOI:10.1109/JSAC.2006.879350.
- [16] Fletcher R, Leyffer S. Solving mixed integer nonlinear programs by outer approximation [J]. Mathematical Programming, 1994, 66(1): 327-349. DOI:10.1007/BF01581153.
- [17] Papandriopoulos J, Evans J S. SCALE: a low-complexity distributed protocol for spectrum balancing in multiuser DSL networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(8): 3711-3724. DOI:10.1109/TIT.2009.2023751.
- [18] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Wireless information and power transfer: energy efficiency optimization in OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12): 6352-6370. DOI:10.1109/TWC.2013.103113.130470.
- [19] Mach P, Becvar Z, Najla M. Resource allocation for D2D communication with multiple D2D pairs reusing multiple channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4): 1008-1011. DOI:10.1109/LWC.2019.2903798.