

# 无线能量传输支持的设备到设备 多播能量协作传输机制\*

曾 闵<sup>1)2)</sup> 罗 颖<sup>1)2)†</sup> 江 虹<sup>1)2)</sup>

1) (西南科技大学信息工程学院, 绵阳 621010)

2) (特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 绵阳 621010)

(2022 年 2 月 28 日收到; 2022 年 5 月 7 日收到修改稿)

能量采集支持的设备到设备多播通信 (energy harvesting(EH)-supported D2D(device-to-device)multicast communications, EH-D2MD) 传输过程中, 簇头将面临可用能量缺失和高能量消耗需求的矛盾问题. 无线能量协作技术是解决该矛盾问题的一种可行方案. 借助无线能量传输技术, D2D 多播簇员传输部分可用能量给簇头, 共同承担内容卸载, 以提升多播簇的传输鲁棒性. 于是, 建立了 EH-D2MD 通信在复用蜂窝频谱资源前提下的能量协作传输机制; 该机制对频谱复用过程中的能量采集, 协作以及数据传输进行了合理规划, 并以多播簇传输速率最大化为优化目标, 联合优化多域资源 (包括: 频谱资源分配、协作时间因子规划、功率控制). 为了探讨 EH-D2MD 通信场景的极限性能, 提出一种近似下界的凸联合求解方案. 经与暴力搜索算法对比, 提出方案可得到多播传输速率的近似最优下界解; 相比无能量协作机制而言, 建立的能量协作传输机制将多播簇传输速率提升 45% 以上, 增强了网络传输鲁棒性.

**关键词:** 能量采集, D2D 多播通信, 能量协作通信, 凸近似方案

**PACS:** 88.80.ht, 43.38.Wl, 87.18.Gh

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220345

## 1 引 言

复用蜂窝频谱的能量采集充电 D2D 通信 (energy harvesting (EH)-supported D2D (device-to-device) communication underlying cellular network, EH-DCCN) 兼具临近通信和绿色通信的优点, 被视作能同时解决频谱和能量紧缺等挑战的重要方案, 并得到业界的广泛关注和探讨. 能量采集的能量源主要分为不受控的环境能源和受控的无线射频能源<sup>[1]</sup>. 无论哪一种能量源, 由于能量转换技术的不成熟, 可用能量均是 EH-DCCN 现实化的一大阻碍. 因此, 以网络传输需求为目标的有效

能量管理方法 (以功率控制为主<sup>[2-4]</sup>) 是 EH-DCCN 方案实施的基础, 也是现阶段的主流关注点.

随着网络设备的不断增长以及网络应用的多样化发展, 内容共享越来越频发. D2D 多播通信 (D2D multicast communication, D2MD) 是蜂窝侧实现内容共享的必要手段之一, 并被广泛应用于视频流、社会消息传播、内容共享、软件更新等方面. 当前大多数关于 EH-DCCN 场景下的资源管理研究主要关注 D2D 对 (即一对一直通通信), 但多播通信技术可以带来更多优势. 例如: D2MD 通过对相同请求内容的共享, 降低了基站对重复内容的下发, 从而提升能量效率<sup>[5,6]</sup>. 因而, D2MD 不仅是未来网络和应用发展的必然趋势, 还可在网络传输模

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61771410)、四川省科技厅基础研发计划 (批准号: 2021YJ0097) 和西南科技大学博士基金项目 (批准号: 18zx7144) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yluo@swust.edu.cn

式上进一步提高对 EH-DCCN 网络的能量管理.

D2MD 引入能量采集支持的网络将面对许多新问题, 其中包括簇头与簇员的能量消耗异构性问题, 即: D2MD 簇头需面临较大的能量消耗压力. 如何在 EH-D2MD 场景下, 提出一种可行的内容传输或能量利用方案, 以应对单簇头节点能量匮乏和消耗之间的矛盾问题, 是本文待解决的关键问题.

能量协作通信是解决能量采集支持的 D2D 多播通信 (EH-supported D2D multicast communications, EH-D2MD) 网络下能量消耗异构性问题的可行方案之一. 能量协作 (或协同) 主要指用户将自己的一部分能量通过无线能量传输技术 (wireless power transfer, WPT) 给另一个可进行能量采集的用户 (或者说用户可以通过无线能量传输的方式与其他用户分享自己收集的一部分能量)<sup>[7,8]</sup>. 例如: 无线体域网<sup>[9]</sup>中, 膝盖处传感器比心脏或大脑处传感器能量采集能力强. 此时, 采集能量多的节点可通过电磁信号无线传输/共享其剩余能量给采集能力弱的节点<sup>[10]</sup>, 以提升整个网络传输鲁棒性. 但是, WPT 技术的能量传输效率相对于环境能源 (如太阳能) 而言较弱, 仅能通过临近或直通的用户进行近距离能量协作. 基于该特点, 能量协作传输方案主要在近距离网络中被广泛研究, 例如无线体域网<sup>[9]</sup>、中继通信<sup>[10]</sup>、认知无线电<sup>[11]</sup>、物联网<sup>[12]</sup>.

基于以上分析, 本文在蜂窝用户和 D2MD 簇复用频谱资源场景下, 就多播簇中单簇头的能量矛盾问题, 设计了合理的能量协作通信机制, 以提升 EH-D2MD 场景传输鲁棒性, 为推进 EH-DCCN 现实化提供了理论补充和支撑. 本文设计的能量协作通信机制充分考虑频谱复用相互干扰, 能量可用性等影响因素, 合理分配了蜂窝用户频谱资源, 设计了能量协作过程, 并求解协作过程中所涉及的频谱分配因子、功率控制因子和时间规划因子.

## 2 国内外研究现状

能量协作通信的兴起与发展依赖于 WPT 技术, 该技术是传输端通过无线射频 (radio frequency, RF) 信号传输其部分能量给接收端. 现有基于能量协作的 EH-DCCN 研究工作中, 可以参照的场景主要有点对点通信<sup>[13,14]</sup>和中继通信<sup>[15,16]</sup>.

基于能量协作的点对点通信中, 文献<sup>[13]</sup>令接收端可传输能量给发送端 (能量发送/sleep 阶段),

以保证发送端对内容的持续传输 (数据传输/active 阶段). 该文献对 sleep 和 active 阶段的时间和协作策略进行了规划, 并研究了高斯白噪声场景和瑞利衰落场景下的协作规划策略. 文献<sup>[14]</sup>在点对点对称全干扰网络下, 利用排队模型建立网络吞吐量最优化模型, 规划了对称共享能量和数据传输阶段的时间和功率分配.

基于能量协作的中继通信中, 数据传输形式有两种: 源节点-目的节点和源节点-中继节点-目的节点. 若源节点的能量充足, 可通过增加能量的方式将传输覆盖到目的节点; 若源节点的能量不足或源-目的之间的信道衰落较大, 中继节点将为源和目的提供数据中继. 对应以上两种数据传输形式, 中继场景下的能量协作衍生出两种应对策略: 中继为源提供能量以增强源的覆盖能力<sup>[15]</sup>, 源为中继提供能量以保障中继的传输能量消耗<sup>[15,16]</sup>. 文献<sup>[15]</sup>同时提出了前文涉及的两种中继协作策略, 并分别探讨了两种协作策略下优缺点. 文中以最大包成功传输率为目标, 规划了两种协作策略下的能量协作大小. 在认知能量采集网络中<sup>[16]</sup>, 次链路为主链路提供数据中继传输支持, 主链路利用无线协能技术 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 给次链路同时传输数据和能量. 该文分步骤迭代求解了数据和能量传输时间、传输功率和波束赋形变量.

经过对以上研究工作的分析, 可以发现: 能量协作可为 EH 支持的通信网络中能量消耗压力较大的节点提供能量, 以提升网络传输鲁棒性. 能量和数据传输的时间规划以及对应的功率控制是获得可行能量协作方案的主要研究点. 虽然以上点对点通信和中继通信下的能量协作可视为无复用干扰场景下的 EH-DCCN 点对点和中继通信, 但是实际的 EH-DCCN 需面临来自蜂窝链路干扰, 这给能量协作策略带来新的扰动因素. 另外, EH-D2MD 场景下的能量协作策略将增加用户选择维度, 即: 选取 D2MD 簇中哪些用户用于能量传输给簇头. 因此, 本文在 EH-D2MD 场景下, 假设蜂窝用户和 D2MD 簇共享频谱资源进行传输, 设计相应的能量协作策略, 并同时研究复用链路分配、协作用户选择、能量和数据传输时间规划、以及对应的功率控制. 经对当前能量协作研究工作的分析发现: 本文在 EH-D2MD 场景下考虑的能量协作策略复杂

度较高, 未有相关的研究工作与之匹配. 因此, 本文的研究内容和研究结果对 EH-D2MD 场景现实化具有较强的理论指导意义.

### 3 基于 WPT 技术的 D2MD 能量协作传输机制

不失一般性, 本文在单蜂窝-多用户场景下对基于 WPT 技术的 D2MD 能量协作传输进行建模, 期望通过该模型提升能量有限的 EH-D2MD 传输鲁棒性. 本节首先对 WPT 支持的 EH-D2MD 场景进行描述, 如图 1 所示, 一个单蜂窝网络下包含一个基站 B(base station, BS),  $I$  个蜂窝用户 (cellular users, CUs) 和  $J$  个 D2MDs. D2MD 可根据兴趣组等形式提前形成 [17,18]. 每个 D2MD 中包含一个簇头节点 (Cluster Head: CH) 和  $N_j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) 个簇员 (cluster members, CMs). 综上, 该单蜂窝网络中包含 1 个 BS、 $I$  个 CUs、 $J$  个 CHs 以及  $M$  个 CMs, 其中  $M = \sum_j N_j$ .

本文致力于在图 1 所示的 EH-D2MD 场景中, 求解 CU 和 D2MD 之间的频率匹配以及匹配后的协作传输问题. 因此, 定义二值变量  $X = \{x_{ij} \in \{0, 1\} | \forall i, j\}$  为 CU 和 D2MD 之间的频率匹配因子. 考虑到 D2MD 群组内多用户能量协作可能会给蜂窝链路带来较大干扰, 本文仅考虑 CU 和 D2MD

一对一频谱匹配. 基于该考虑, 频谱匹配因子  $X$  将具备以下约束:

$$\begin{cases} (c1) & \sum_{i=1}^I x_{ij} \leq 1 (\forall j), \\ (c2) & \sum_{j=1}^J x_{ij} \leq 1 (\forall i), \end{cases} \quad (1)$$

式中, (c1) 表示一个 EH-D2MD 最多可复用一个蜂窝链路资源, 同理 (c2) 表示一个蜂窝链路仅可被一个 EH-D2MD 复用.

当某一频谱复用因子成立, 即存在  $i, j$  使得  $x_{ij} = 1$  时 (例如图 1 中所示 D2MD<sub>1</sub> 和 CU<sub>1</sub>), D2MD 将利用基站的能量和传输距离优势, 在蜂窝下行链路进行能量采集; 为了保障 D2MD 簇头在内容共享时的鲁棒传输, 簇员将利用 WPT 技术给予簇头能量支持; 另外, 为尽可能提高 EH-D2MD 的能量利用率, EH-D2MD 的多播内容共享传输将复用蜂窝上行链路. 所以, 在频谱匹配前提下, 本文建立了如图 2 所示的 CU 和 EH-D2MD 一对一能量协作传输过程.

图 2 中, 蜂窝用户 (CU <sub>$i$</sub> ) 和 EH-D2MD 簇 (可由簇头编号 CH <sub>$j$</sub>  表示) 共同使用一个频谱资源进行数据传输. 那么, 本文将一个能量协作的数据传输优化阶段划分为一个标准时间戳, 并由  $T$  表示. 在该时间戳  $[0, T]$  内, 整个用户的状态变化甚微,

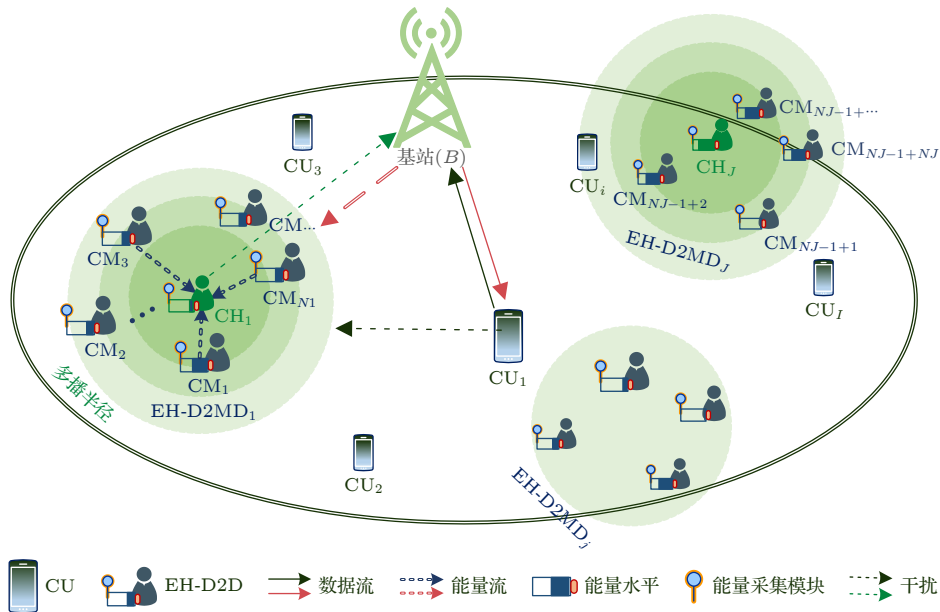


图 1 单簇头的能量协作内容卸载场景

Fig. 1. Energy cooperative content offloading scheme for a single cluster head multicast scenario.



各用户及其相互间的信道状态可以预估并保持稳定. 因此, 本文在该前提下, 对频谱匹配因子、能量采集和数据传输时间、以及各阶段的用户传输功率进行优化分配.

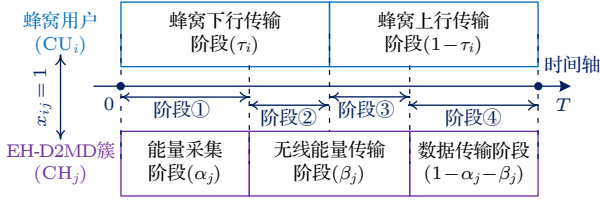


图2 CU和EH-D2MD一对一频谱复用下能量协作传输机制

Fig. 2. Energy cooperative transmission scheme when one CU and one EH-D2MD share a spectrum.

图2中, 蜂窝用户的下行和上行数据传输分别占到时间戳的 $\tau_i$ 和 $1-\tau_i$ 部分; 对于EH-D2MD簇而言, 基于能量先采集-后使用<sup>[19]</sup>原则, 簇中所有簇员利用复用频谱, 将基站下行传输功率的干扰转化成能量, 完成能量采集(阶段①, 假设占比为 $\alpha_j$ ); 随后, 在当前时隙下, 为了尽可能保障簇头内容的下发, 提升多播传输鲁棒性, 部分能量较为充足的簇员将利用临近优势将部分可用能量传输给簇头(阶段②和③, 假设占比为 $\beta_j$ ), 实现能量协作; 最后, 簇头利用阶段①—③积蓄的能量, 在阶段④(假设占比为 $1-\alpha_j-\beta_j$ )进行数据多播. 理论上, 蜂窝上行传输时, 簇头亦可将蜂窝用户的传输干扰转化为能量. 但是, 由于蜂窝用户与D2MD之间不属于临近通信(避免通信过程中的严重互干扰), 并且蜂窝用户的最大传输功率限制, 本文不考虑簇头采集蜂窝用户的传输干扰作为能量.

如文献<sup>[14]</sup>, 本文以提升传输速率(即香农速率为鲁棒多播传输指标. 根据阶段①—④的假设, 可将蜂窝用户(CU<sub>i</sub>)和EH-D2MD簇(CH<sub>j</sub>)之间的传输速率和能量情况分别描述如下.

阶段①( $\alpha_j$ ): 蜂窝用户(*i*)的下行传输速率( $R_{Bi}^{(1)}$ )和EH-D2MD簇员的采集能量( $E_j^{(1)}$ 和 $E_m^{(1)}$ )可分别表示为

$$R_{Bi}^{(1)} = \sum_j x_{ij} \cdot \alpha_j \cdot \log \left( 1 + \frac{p_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bi}}{n_0} \right), \quad (2)$$

$$E_j^{(1)} = \sum_i x_{ij} \cdot \alpha_j \cdot p_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bj} \cdot \eta_j, \quad (3)$$

$$E_m^{(1)} = \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot C_{jm} \cdot \alpha_j \cdot p_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bj} \cdot \eta_j, \quad (4)$$

(2)—(4)式中,  $p$ ,  $G$ ,  $\eta$ ,  $C$ ,  $n_0$ 分别表示传输功率、信道增益、能量采集电路硬件转换效率、成簇指示因子, 信道噪声功率. 信道 $G_{uv}$ ( $u, v$ 表示蜂窝网络中的任意用户)由路径衰落和瑞利衰落共同表征, 其具体模型为:  $G_{uv} = d_{uv}^{-\gamma} \cdot |h|$ . 其中 $d$ ,  $\gamma$ ,  $h$ 分别指代用户 $u, v$ 之间的物理距离, 路径衰落因子, 瑞利衰落模型.  $h$ 服从均值为0, 方差为1的高斯分布 $CN(0, 1)$ . 信道噪声功率 $n_0$ 可表示为信道带宽( $BW$ )和信道噪声功率密度( $\rho$ )的乘积:  $n_0 = BW \cdot \rho$ .

阶段②( $\tau_i - \alpha_j$ ): 蜂窝用户(*i*)的下行传输速率( $R_{Bi}^{(2)}$ ), 以及基站和EH-D2MD簇员对簇头的能量协作( $E_j^{(2)}$ ):

$$R_{Bi}^{(2)} = \sum_j x_{ij} \cdot (\tau_i - \alpha_j) \cdot \log \left( 1 + \frac{p_{Bi}^{(2)} \cdot G_{Bi}}{\sum_m y_{jm} \cdot p_m^{(2)} \cdot G_{mi} + n_0} \right), \quad (5)$$

$$E_j^{(2)} = \sum_i x_{ij} \cdot (\tau_i - \alpha_j) \cdot \left( p_{Bi}^{(2)} \cdot G_{Bj} + \sum_m y_{jm} \cdot p_m^{(2)} \cdot G_{jm} \right) \cdot \eta_j, \quad (6)$$

(5)和(6)式中,  $y_{jm}$ 表示能量协作因子, 其为1时指代: D2MD<sub>j</sub>簇中, 标号为 $m$ 的簇员被选中传输部分可用能量 $p_m^{(2)}$ 给簇头, 进行能量协作, 反之则不传输. 由于D2MD簇已经形成, 只有自身簇员才能传输能量给簇头, 其他簇员则不行. 因此,  $y_{jm}$ 将服从以下约束:  $\sum_m y_{jm} \leq \sum_m C_{jm}$ .

阶段③( $\alpha_j + \beta_j - \tau_i$ ): 蜂窝用户(*i*)的上行传输速率( $R_{iB}^{(3)}$ )和EH-D2MD簇员对簇头的能量协作( $E_j^{(3)}$ ):

$$R_{iB}^{(3)} = \sum_j x_{ij} \cdot (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot \log \left( 1 + \frac{p_{iB}^{(3)} \cdot G_{iB}}{\sum_m y_{jm} \cdot p_m^{(3)} \cdot G_{mB} + n_0} \right), \quad (7)$$

$$E_j^{(3)} = \sum_i \sum_m x_{ij} \cdot y_{jm} \cdot (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot p_m^{(3)} \cdot G_{jm} \cdot \eta_j. \quad (8)$$

阶段④ $(1 - \alpha_j - \beta_j)$ : 蜂窝用户  $(i)$  的上行传输速率  $(R_{iB}^{(4)})$  和 EH-D2MD 簇的多播数据传输  $(R_j^{(4)})$ :

$$R_{iB}^{(4)} = \sum_j x_{ij} \cdot (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log \left( 1 + \frac{p_{iB}^{(4)} \cdot G_{iB}}{p_j^{(4)} \cdot G_{jB} + n_0} \right), \quad (9)$$

$$R_j^{(4)} = \min_{\Delta m} \left\{ C_{jm} \cdot (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log \left( 1 + \frac{p_j^{(4)} \cdot G_{jm}}{\sum_i x_{ij} \cdot p_{iB}^{(4)} \cdot G_{im} + n_0} \right) \right\}, \quad (10)$$

(10) 式表示每个 EH-D2MD 的多播传输速率  $R_j^{(4)}$  是当前簇员最小的速率值。

基于能量采集的用户必须满足能量守恒定理, 即用户消耗能量需小于等于采集能量. 于此, 基站、蜂窝用户、EH-D2MD 用户的能量约束可分别总结如下:

$$\sum_i x_{ij} \cdot (\alpha_j \cdot p_{Bi}^{(1)} + (\tau_i - \alpha_j) \cdot p_{Bi}^{(2)}) \leq p_B^{\text{th}}, \quad (11)$$

$$\sum_j x_{ij} \cdot [(\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot p_{iB}^{(3)} + (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot p_{iB}^{(4)}] \leq p_I^{\text{th}}, \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij} \cdot C_{jm} \cdot [(\tau_i - \alpha_j) \cdot p_m^{(2)} + (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot p_m^{(3)}] \leq E_m^{\text{th}}, \quad (13)$$

$$(1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot p_j^{(4)} \leq E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)}, \quad (14)$$

(11) 式表示基站在阶段①和②的消耗需小于该标准时间戳下的传输能量阈值  $p_B^{\text{th}}$ . 同理, (12) 式表示蜂窝用户  $i$  在阶段③和④的传输能耗需小于传输能量阈值  $p_I^{\text{th}}$ . 为了确保能量守恒定理, (13) 和 (14) 式分别表示簇员  $m$  和簇头  $j$  在阶段②—④的消耗需小于等于各自采集到的能量。

根据以上假设和分析, 本文以最大化 EH-D2MD 的传输速率为目标, 进行频谱匹配因子、能量协作和数据传输时间规划因子、以及传输功率分配. 该速率最优化模型可建立如下:

$$\begin{aligned} & \text{maximize}_{\{X, Y, \alpha, \beta, \tau, P\}} : \sum_j R_j^{(4)} \\ & \text{s.t.} \\ & (c1) R_{Bi}^{(1)} + R_{Bi}^{(2)} \geq R_B^{\text{th}}, \\ & (c2) R_{iB}^{(3)} + R_{iB}^{(4)} \geq R_I^{\text{th}}, \\ & (c3) R_j^{(4)} \geq R_j^{\text{th}}, \\ & (c4) x_{ij} \cdot (\tau_i - \alpha_j) \geq 0, \\ & (c5) x_{ij} \cdot (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \geq 0, \\ & (c6) X, Y \in \{0, 1\}, \alpha, \beta, \tau \in [0, 1], P \geq 0, \\ & (c7) (11) \text{—}(14), \end{aligned} \quad (15)$$

问题 (15) 中的变量  $X, Y, \alpha, \beta, \tau, P$  分别表示频率匹配因子集合  $\{x_{ij}\}$ , 能量协作用户指示因子集合  $\{y_{jm}\}$ , 能量采集时间占比集合  $\{\alpha_j\}$ , 能量协作时间占比集合  $\{\beta_j\}$ , 蜂窝下行时间占比集合  $\{\tau_i\}$ , 以及功率分配变量集合  $\{p_{Bi}^{(1)}, p_{Bi}^{(2)}, p_{iB}^{(3)}, p_{iB}^{(4)}, p_m^{(2)}, p_m^{(3)}, p_j^{(4)}\}$ . 约束 (c1) 表示基站到蜂窝用户的下行传输速率需满足阈值  $R_B^{\text{th}}$ . 由于是频谱复用, 同一频谱下的用户在使用能量过程中必须确保不给对方产生较大干扰而使对方传输中断/失效. 为了保障多播簇复用蜂窝链路时不给蜂窝用户的传输产生较大干扰, 确保蜂窝链路的传输速率质量, 蜂窝到基站的上行速率应不小于传输阈值  $R_I^{\text{th}}$ , 表示为约束 (c2). 同理, 为保障 EH-D2MD 簇的传输速率, 约定每个簇的最小传输速率为  $R_j^{\text{th}}$ , 如约束 (c3) 所示. (c4) 和 (c5) 分别对能量采集、协作、数据传输阶段进行约束。

经分析发现, 问题 (15) 中的变量包含二值 (离散) 变量  $X, Y$ , 连续变量  $\alpha, \beta, \tau, P$ , 而传输速率  $R_{Bi}^{(2)}, R_{iB}^{(3)}, R_{iB}^{(4)}, R_j^{(4)}$  中存在的  $\log$  方程也均是关于求解变量的非凸方程. 约束 (11)—(14) 中还包含了连续变量的乘积. 从而可以判断, 问题 (15) 属于典型的非凸混合整数非线性规划 (non-convex mixed integer non-linear programming, non-convex MINLP) 问题. 该 non-convex MINLP 问题的复杂性使得其算法复杂度呈 NP 难. 为联合求得以上 D2MD 能量协作传输机制的速率最大化问题, 本文设计了一种凸近似求解方案, 致力于给出问题 (15) 的联合近似最优解, 便于分析整个网络的性能。

## 4 凸近似联合求解方案

凸近似联合求解方案通过紧下界近似、变量等

价替换等操作将问题 (15) 近似转化为 convex MINLP 问题, 具体凸化了 log 传输速率、频谱复用和能量协作二值变量乘积、以及时间规划和功率控制连续变量乘积等非凸表达式; 随后利用经典算法: 广义 bender 分解 (generalized bender decomposition, GBD) 联合求得转化后 convex MINLP 问题的最优解. 本方案总共分为以下几步.

1) 根据问题 (15) 中对用户的传输速率约束可知: 问题的可行解必然在大信干噪比 (SINR) 前提下, 才能满足问题 (15) 的速率约束. 因此, 在大信噪比前提下, 本文利用 (16) 式对速率方程  $R_{Bi}^{(2)}$ ,  $R_{iB}^{(3)}$ ,  $R_{iB}^{(4)}$ ,  $R_j^{(4)}$  进行近似; (16) 式被文献 [20] 证明: 当  $a = \Xi_0/(1 + \Xi_0)$ ,  $b = \log(1 + \Xi_0) - a \log \Xi_0$  时, 该近似是紧密的.

$$a \log \Xi_0 + b \leq \log(1 + \Xi_0) \begin{cases} a = \frac{\Xi_0}{1 + \Xi_0}, \\ b = \log(1 + \Xi_0) - a \log \Xi_0. \end{cases} \quad (16)$$

2) 利用等式  $p = e^{\tilde{p}}$ , 将功率变量  $p$  等价替换为  $\tilde{p}$ ;

3) 假设  $(\tau_i - \alpha_j), (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) > 0$ , 则再次利用等式  $\hat{p} = t \cdot \tilde{p}$ , 将功率变量  $\tilde{p}$  替换为  $\hat{p}$ . 其中,  $t \in \{\alpha_j, (\tau_i - \alpha_j), (\alpha_j + \beta_j - \tau_i)\}$ .

4) 引入二值中间变量  $z_{ijm}$  等价替换二值变量的乘积  $x_{ij} \cdot y_{jm}$ , 即  $z_{ijm} = x_{ij} \cdot y_{jm}$ , 并增加约束

(17)<sup>[21]</sup>; 需要强调的是, 用二值变量  $z_{ijm}$  和约束 (17) 对二值变量乘积  $(x_{ij} \cdot y_{jm})$  进行替换不属于近似, 而是一种线性化的精确方法<sup>[22]</sup>.

$$\begin{aligned} z_{ijm} &\leq x_{ij}, \\ z_{ijm} &\leq y_{jm}, \\ z_{ijm} &\geq x_{ij} + y_{jm} - 1, \end{aligned} \quad (17)$$

将以上 4 步应用到 (2)—(14) 式中, 可转换如下:

$$R_{Bi}^{(1)} = \sum_j x_{ij} \cdot \alpha_j \cdot \log \left( 1 + \frac{\hat{p}_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bi}}{\alpha_j \cdot n_0} \right), \quad (18)$$

$$E_j^{(1)} = \sum_i x_{ij} \cdot \hat{p}_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bj} \cdot \eta_j, \quad (19)$$

$$E_m^{(1)} = \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot C_{jm} \cdot \hat{p}_{Bi}^{(1)} \cdot G_{Bj} \cdot \eta_j, \quad (20)$$

需要说明的是: (2)—(4) 式转换成 (18)—(20) 式没有利用凸近似联合求解方案中的第 1 和 2 步, 仅利用第 3 步将原公式进行转换. 这是因为 (2) 式本身在二值变量  $x_{ij}$  固定时即为一个凹函数 (参见文献 [23] 关于  $\log(1+x)$  的凹凸性). 当利用第 3 步将 (2) 式转换成 (18) 式后, 利用透视函数的保凸性 (透视函数凹凸性证明可参考文献 [23] 的 3.2.6 节), 当二值变量  $x_{ij}$  固定时, (18) 式是关于连续变量  $\{\alpha_j, \hat{p}_{Bi}^{(1)}\}$  的联合凹函数:

$$R_{Bi}^{(2)} = \sum_j x_{ij} a_{Bi}^{(2)} \cdot \left( \hat{p}_{Bi}^{(2)} + (\tau_i - \alpha_j) \cdot \log G_{Bi} + b_{Bi}^{(2)} \right) - (\tau_i - \alpha_j) a_{Bi}^{(2)} \cdot \log \left( \sum_j \sum_m z_{ijm} \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(2)}}{(\tau_i - \alpha_j)}} \cdot G_{mi} + n_0 \right), \quad (21)$$

$$E_j^{(2)} = \left( \sum_i x_{ij} \cdot (\tau_i - \alpha_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_{Bi}^{(2)}}{(\tau_i - \alpha_j)}} \cdot G_{Bj} + \sum_i \sum_m z_{ijm} \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(2)}}{(\tau_i - \alpha_j)}} \cdot G_{jm} \right) \cdot \eta_j, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} R_{iB}^{(3)} &= \sum_j x_{ij} a_{iB}^{(3)} \cdot \left( \hat{p}_{iB}^{(3)} + (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \log G_{iB} + b_{iB}^{(3)} \right) \\ &\quad - (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) a_{iB}^{(3)} \log \left( \sum_j \sum_m z_{ijm} \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(3)}}{(\alpha_j + \beta_j - \tau_i)}} \cdot G_{mB} + n_0 \right), \end{aligned} \quad (23)$$

$$E_j^{(3)} = \sum_i \sum_m z_{ijm} \cdot (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(3)}}{(\alpha_j + \beta_j - \tau_i)}} \cdot G_{jm} \cdot \eta_j, \quad (24)$$

$$R_{iB}^{(4)} = \sum_j x_{ij} a_{iB}^{(4)} \cdot \left[ \hat{p}_{iB}^{(4)} + (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log G_{iB} - (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log \left( e^{\frac{\hat{p}_j^{(4)}}{(1 - \alpha_j - \beta_j)}} \cdot G_{jB} + n_0 \right) + b_{iB}^{(4)} \right], \quad (25)$$

$$\hat{R}_j^{(4)} = \min_{\Delta_m} C_{jm} a_{jm}^{(4)} \cdot \left[ \hat{p}_j^{(4)} + (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log G_{jm} - (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot \log \left( \sum_i x_{ij} \cdot e^{\frac{\hat{p}_{iB}^{(4)}}{(1-\alpha_j-\beta_j)}} \cdot G_{im} + n_0 \right) + b_{jm}^{(4)} \right], \quad (26)$$

(21)–(26) 式是通过方案第 1–4 步对 (5)–(10) 式的转换. 它们具有凹凸性 (该凹凸性特指二值变量  $x_{ij}, y_{jm}$  固定的情况下存在), 根据透视函数的保凸性, 以及  $\log$ -sum-exp( $x$ ) 和指数函数 ( $e^x$ ) 的凸性, (21), (23), (25), (26) 式是关于变量  $\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}$  的联合凹函数, (22) 和 (24) 式是凸函数. 同理, (27)–(29) 式亦具备凸性.

$$\sum_i x_{ij} \cdot \left( \hat{p}_{Bi}^{(1)} + (\tau_i - \alpha_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_{Bi}^{(2)}}{(\tau_i - \alpha_j)}} \right) \leq p_B^{\text{th}}, \quad (27)$$

$$\sum_j x_{ij} \cdot \left[ (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot e^{\frac{\hat{p}_{iB}^{(3)}}{(\alpha_j + \beta_j - \tau_i)}} + (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_{iB}^{(4)}}{(1-\alpha_j-\beta_j)}} \right] \leq p_I^{\text{th}}, \quad (28)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij} \cdot C_{jm} \cdot \left[ (\tau_i - \alpha_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(2)}}{(\tau_i - \alpha_j)}} + (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) \cdot e^{\frac{\hat{p}_m^{(3)}}{(\alpha_j + \beta_j - \tau_i)}} \right] \leq E_m^{(1)}. \quad (29)$$

但是, 需要说明的是, 由于指数函数的凸性及透视函数的保凸性, 使得不等式 (30) 左右两侧均是一个凸函数. 这使得该不等式变成了一个凸差约束<sup>[24]</sup>:

$$(1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_j^{(4)}}{(1-\alpha_j-\beta_j)}} \leq E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)}. \quad (30)$$

本文通过引入一个中间变量  $E_j$ , 用于等价替换用户  $j$  的采集能量  $E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)}$ . 同时, 为了满足凸约束, 通过最小化  $E_j$  和  $E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)}$  之间的距离来使  $E_j$  和  $E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)}$  等价. 定义  $E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)} - E_j \leq \delta_j$ . 因而, (30) 式可近似等价于优化 (31) 式.

minimize :  $\delta_j$

s.t.

$$(c1) (1 - \alpha_j - \beta_j) \cdot e^{\frac{\hat{p}_j^{(4)}}{(1-\alpha_j-\beta_j)}} \leq E_j,$$

$$(c2) E_j^{(1)} + E_j^{(2)} + E_j^{(3)} - E_j \leq \delta_j. \quad (31)$$

经过以上分析, 问题 (15) 经过方案的 1–4 步可近似转化为以下问题:

$$\text{maximize}_{\{X, Y, Z, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}} : \sum_j \left( \hat{R}_j^{(4)} + \delta_j \right)$$

s.t.

$$(c1) \hat{R}_{Bi}^{(1)} + \hat{R}_{Bi}^{(2)} \geq R_B^{\text{th}},$$

$$(c2) \hat{R}_{iB}^{(3)} + \hat{R}_{iB}^{(4)} \geq R_I^{\text{th}},$$

$$(c3) \hat{R}_j^{(4)} \geq R_j^{\text{th}},$$

$$(c4) x_{ij} \cdot (\tau_i - \alpha_j) > 0,$$

$$(c5) x_{ij} \cdot (\alpha_j + \beta_j - \tau_i) > 0,$$

$$(c6) X, Y, Z \in \{0, 1\}, \alpha, \beta, \tau \in [0, 1], \hat{P} \geq 0,$$

$$(c7) (16)–(28), (30)–(c1), (30)–(c2). \quad (32)$$

如上所述, 问题 (32) 是一个 convex-MINLP 问题, 其具备以下特性: 当频谱匹配二值因子  $X$ 、能量协作二值因子  $Y$  以及中间变量二值因子  $Z$  固定时, 问题 (32) 是一个关于 (时间规划和功率控制) 连续变量  $\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}$  的联合凸速率最大化问题, 即速率优化目标是凹函数; 约束 (c1)–(c7) 均是凸约束, 使得可行解集具有凸性; 此时, 问题 (32) 可被凸优化算法求得连续变量  $\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}$  的联合最优解.

当前求解 convex-MINLP 问题的方法较多, 外逼近 (outer approximation, OA)、分支定界法 (branch and bound, BB)、广义 bender 分解 (generalized benders decomposition, GBD) 等均为经典且应用广泛的算法. GBD 相较于 OA 和 BB 有两个较为明显的优势: 1) GBD 不需要对优化目标和约束方程进行变量求导; 2) GBD 不需要建立分支定界树, 尤其是当二值变量维度较多时<sup>[25]</sup>. 因此, 本文将基于 GBD 对问题 (32) 进行联合求解.

为了方便表述 GBD 如何求解问题 (32), 本文将问题 (32) 中的目标方程用  $F(X, Y, Z, \alpha, \beta, \tau, \hat{P})$  表示, 即  $F(X, Y, Z, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) = \sum_j (\hat{R}_j^{(4)} + \delta_j)$ , 将约束用方程  $G_s(X, Y, Z, \alpha, \beta, \tau, \hat{P})$  进行对应表示, 其中,  $s=1, 2, \dots, S$ ,  $S$  为约束的总个数. 例如,  $G_1 = \hat{R}_{Bi}^{(1)} + \hat{R}_{Bi}^{(2)} - R_B^{\text{th}} \geq 0$ .

假设, GBD 算法的每一次迭代次数用  $t$  表示.



### 1) GBD 主问题

基于以上表述, GBD 算法求解问题 (32) 时的主问题可表达如下:

$$\begin{aligned} & \underset{\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}}{\text{maximize}} : F(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}), \\ & \text{s.t. } G_s(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \geq 0, \quad (33) \\ & \quad (s = 1, 2, \dots, S), \end{aligned}$$

并可写出问题 (33) 的拉格朗日方程 (34), 从而求得拉格朗日乘子  $\mu^t = \{\mu_s\}$ :

$$\begin{aligned} & L^*(\bar{X}_t, \bar{Y}_t, \bar{Z}_t, \mu) \\ & = F(\bar{X}_t, \bar{Y}_t, \bar{Z}_t, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \\ & \quad + \sum_s \mu_s \cdot G_s(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \\ & \Leftrightarrow \min_{\mu} \left[ \max_{\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}} \left\{ F(\bar{X}_t, \bar{Y}_t, \bar{Z}_t, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \sum_s \mu_s \cdot G_s(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \right\} \right]. \quad (34) \end{aligned}$$

经过 GBD 算法主问题的求解, 将主问题的拉格朗日方程定义为问题 (32) 的下界值, 即:  $F_{\text{low}} = L^*(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P})$ . 由于二值变量的设定没有规律, 主问题的求解结果将出现两种情况: 不可行和可行. 当主问题不可行时, 二值变量  $\{\bar{X}_t, \bar{Y}_t, \bar{Z}_t\}$  的取值使得问题 (32) 的约束不满足要求, 则  $G_{s|\forall s}(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) < 0$ . 此时, 可通过可行割集进行松弛, 并将此时求得的松弛因子  $\{\lambda_s\}$  赋值为  $\lambda^k$ :

$$\begin{aligned} & L_*(\bar{X}_t, \bar{Y}_t, \bar{Z}_t, \lambda) \\ & = \sum_s \lambda_s \cdot G_s(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \Leftrightarrow \\ & \min_{\lambda} \left[ \max_{\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}} \left\{ \sum_s \lambda_s \cdot G_s(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha, \beta, \tau, \hat{P}) \right\} \right] \\ & \text{s.t. } \sum_s \lambda_s = 1, \quad \forall \lambda_s \geq 0. \quad (35) \end{aligned}$$

2) GBD 主问题可行时, 求解 GBD 松弛 master 问题

$$\begin{aligned} & \underset{\{X, Y, Z, f_0\}}{\text{maximize}} : f_0 \\ & \text{s.t.} \\ & (c1) \quad f_0 \leq L^*(X, Y, Z, \mu^t), \\ & (c2) \quad L^*(X, Y, Z, \lambda^k) < 0. \quad (36) \end{aligned}$$

### GBD算法执行步骤:

**初始化.** 定义GBD每一次迭代的计数器为  $t$ , 并初始化为1;  $k$ 为主问题不可行后 $\lambda$ 的计数次数, 初始化为0;  $\lambda^k = \{0\}$ , 设置使算法停止的上下界阈值  $\zeta = 0.001$ .

**步骤1:** 在取值区间内给定一组二值变量  $\{\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}\}$ , 根据问题(33)和(34)分别求得此时的连续变量和拉格朗日乘子最优解  $\{\alpha^*, \beta^*, \tau^*, \hat{P}^*\}, \mu^*$ ; 将此时的目标方程  $F(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha^*, \beta^*, \tau^*, \hat{P}^*)$  设为下界  $U$ ;

**步骤2:** 若此时给定二值变量的问题(33)可行, 则将  $\mu^t = \mu^*$ , 并求解松弛的master问题(36); 将问题(36)求得的二值变量定义为新的  $\{\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}\}$ , 以及目标方程  $F(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha^*, \beta^*, \tau^*, \hat{P}^*)$  的上界  $f_0$ ;

**步骤3:** 根据步骤2求得的二值变量, 求解问题(33), 并得到此时的目标方程  $F(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \alpha^*, \beta^*, \tau^*, \hat{P}^*)$  设为新的下界  $U$ ;

**步骤3(a):** 若步骤3可行, 判断  $|f_0 - U| \leq \zeta$ , 则算法结束; 反之, 根据求解问题(34)得到  $\mu^*$ ; 令  $t = t + 1$ ;  $\mu^t = \mu^*$ ; 返回步骤2;

**步骤3(b):** 若步骤3不可行, 求解松弛问题(35); 令  $k = k + 1$ ;  $\lambda^k = \{\lambda_s\}$ ; 返回步骤2.

### 3) GBD 算法收敛性证明

**定理 1** 对于具有 convex-MINLP 性质的问题 (32), GBD 算法可在有限迭代次数后使得问题 (32) 收敛到  $\zeta (\zeta > 0)$ ——最优解.

**证明:** 根据问题 (32) 和 GBD 算法关于问题 (32) 的主问题及松弛后的 master 问题, 以下 4 个观点成立:

**观点 1:** 连续变量  $\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}$  的解空间是由 (33) 式中约束定义的非空紧凸集, GBD 主问题 (33) 是关于连续变量  $\{\alpha, \beta, \tau, \hat{P}\}$  的凸问题;

**观点 2:** 主问题 (33) 的目标和约束连续且一阶可微;

**观点 3:** 离散 (二值) 变量  $\{X, Y, Z\}$  的总个数小于无穷大, 即  $|\{X, Y, Z\}| < \infty$ ;

**观点 4:** 由参考文献 [26] 中定理 2 及其证明可知, 问题 (32) 在给定的  $\zeta > 0$  下收敛.

## 5 性能分析

本节主要在凸近似联合求解方案和 GBD 算法基础上, 对 D2MD 能量协作 (energy cooperation,



EC) 传输机制进行性能分析. 为了分析 EC 传输机制有效性, 本文对比了暴力搜索算法 (exhausted searching method, ESM) 和无能量协作 (without EC) 的传输机制. 暴力搜索算法相比于凸近似联合求解和 GBD 算法而言, 可得到 EC 传输机制的最优解. Without EC 传输机制中, 单簇头依靠自身可用能量在当前时隙下进行能效最大化的传输. 因此, 本节首先给出 EH-D2MD 场景相关的仿真参数; 其次, 再对比 3 种算法在仿真场景中的性能; 最后, 对 EC 传输机制和 EH-D2MD 架构特点进行详细的分析.

### 5.1 仿真场景参数设置

本文建立与图 1 匹配的单蜂窝网络. 如图 3 所示的例图, 该网络是一个 800 m\*800 m 的正方形. 在该单蜂窝网络区域中, 基站 (BS) 位于网络的中心, 如图 3 中黑色梅花 (♣) 所示. 蜂窝用户 (c) 和 D2MD 簇随机分布在网络中. 蜂窝用户如图 3 中的蓝色圆圈 (○) 所示. 由于 D2MD 簇已经提前规划和分配, 每个簇已经确定好簇头和簇员. 那么, 如图 3 中的红色成团部分所示: 簇头由红色三角形 ( $\Delta$ ) 表示, 簇员由星号 (\*) 所示. 为满足 D2D 传输需求, D2MD 簇员在距离簇头 50 m, 100 m, 150 m 范围内随机分布. 对于场景中涉及的信道衰落, 能量转换效率等变量设置如表 1 所示.

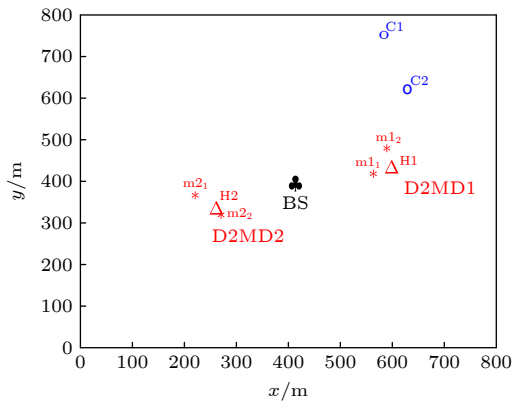


图 3 一个单蜂窝 EH-D2MD 通信场景示例

Fig. 3. A single EH-D2MD communication scenario example..

### 5.2 能量协作传输方案有效性分析和 EH-D2MD 通信架构性能分析

考虑到 ESM 算法需对问题 (15) 中的变量 (包括二值 (离散) 变量, 连续变量) 进行全局搜索, 其

表 1 EH-D2MD 通信场景仿真参数设置表<sup>[27]</sup>

Table 1. Simulation parameters setting for EH-D2MD scenario<sup>[27]</sup>.

变量	物理含义	参数设置
$I$	蜂窝用户个数	[2—6]
$J$	D2MD簇个数	[2—6]
$N_j$	第 $j$ 个D2MD簇中簇员个数	[2—10]
$T$	传输时隙	1 s
$\gamma$	路径衰落指数	蜂窝链路: [3—5], D2D链路: [1.6—1.8]
BW	信道带宽	150 kHz
$\rho$	噪声功率密度	-174 dBm/Hz
$h$	瑞利信道衰落因子	正太高斯分布
$\eta$	能量转换效率	[0.6—0.9]
$p_B^{\text{th}}$	基站传输功率阈值	43 dBm
$p_I^{\text{th}}$	蜂窝用户传输功率阈值	24 dBm
$p_D^{\text{th}}$	D2D用户传输功率阈值	17 dBm
$R_B^{\text{th}}$	蜂窝下行传输速率阈值	1 bps/Hz
$R_I^{\text{th}}$	蜂窝上行传输速率阈值	2 bps/Hz
$R_J^{\text{th}}$	D2MD多播传输速率阈值	4 bps/Hz

算法复杂度与用户数目呈指数关系<sup>[28]</sup>. 因而, 本节考虑的多播簇数量为 1, 簇中成员数目在 2—10 中变化, 蜂窝用户数量为 2, D2D 多播簇半径分别为 50 m 和 150 m 时对 3 种算法进行仿真对比分析. 图 4 给出 3 种算法 (ESM, EC 和 without EC) 关于单个 EH-D2MD 簇的多播速率均值和方差与簇员个数之间的关系结果. 经过分析可以得出以下结论:

1) 在不同的 D2D 多播簇半径场景下, 对比 EC 和 ESM 的算法性能可以发现: 凸近似联合求解方案和 GBD 算法的结合, 可得到原问题 (15) 的近似下界最优解.

2) 当 D2D 多播簇半径为 50 m 和 150 m 时, 在 WPT 技术加持下, 多簇员能量协作的单簇头内容分发策略 (即 EC 机制) 比没有进行能量协作 (without EC) 的单时隙平均多播速率分别提升了约 1 倍和 45%; D2D 多播簇半径为 150 m 时平均多播速率提升程度不如半径为 50 m, 其原因是: 距离较大时路径损耗和衰落较大, 从而造成传输速率降低和无线能量传输损耗增大.

3) EH-D2MD 簇的平均多播速率随簇中个数的增加而呈上升又下降的趋势; 该现象产生的原因在于: a) 平均多播速率随簇员个数上升而上升是因为当簇中簇员总数较少时, 能参与协作的簇员亦

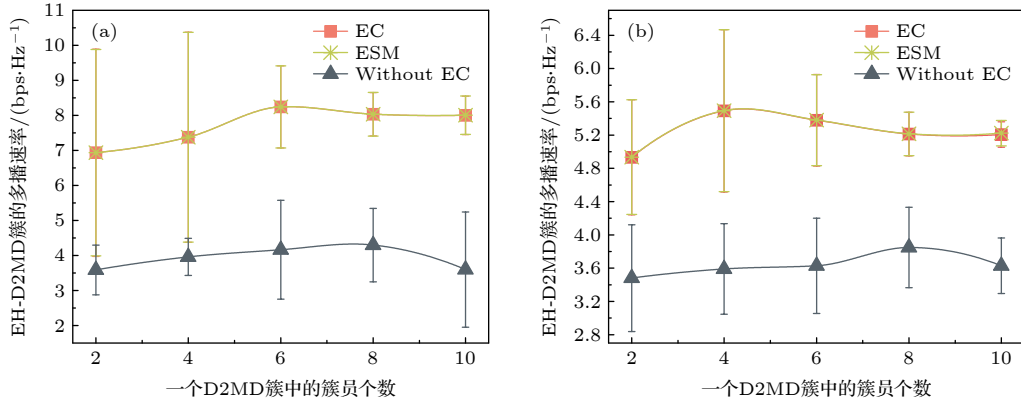


图 4 3 种算法在多播簇半径分别为 50 m (a) 和 150 m (b) 场景下的性能

Fig. 4. The performance of the above three algorithms in the scenario where the radius of multicast cluster are 50 m (a) and 150 m (b).

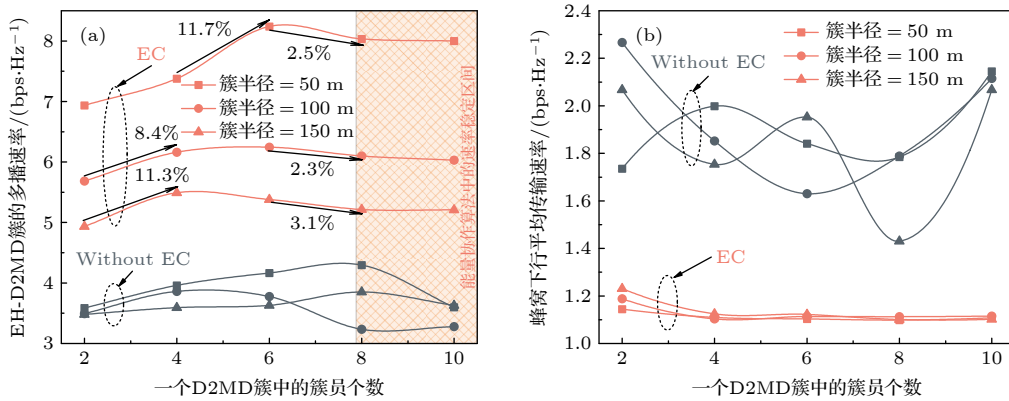


图 5 EC 和 without EC 算法在簇半径为 50 m, 100 m, 150 m 场景下的性能对比 (a) 多播簇平均传输速率; (b) 复用蜂窝链路下行平均传输速率

Fig. 5. Performance comparison of EC and Without EC algorithms in scenarios with cluster radius of 50 m, 100 m, and 150 m: (a) The average transmission rate of multicast cluster; (b) the average transmission rate of downlink of cellular user.

相对较少, 相对于簇员总数较多时的速率提升较少; b) 平均多播速率随簇员个数上升到一定程度呈略微下降趋势是因为簇内成员越多, 成员随机分布到最差信道时的概率亦越大, 信道状况也越差, 速率也随之下降。

4) 根据 EC 算法对传输速率的性能分析, 多播速率的方差随簇内成员数量的增加而减少; 其原因在于: 当簇内成员越多, 分布越均匀, 网络中最差用户的状态也越稳定, 从而导致多播簇速率的方差亦越小。

由于 ESM 算法复杂度与用户数呈指数关系<sup>[28]</sup>, 图 5 仅给出 EC 和 without EC 在簇半径为 50 m, 100 m, 150 m 场景下, 与图 4 类似场景设置的性能对比分析。同理, 通过图 5 可得到图 4 中关于 B 和 C 两方面的性能结论。另外, 通过图 5, 还可以发现以下结论:

1) 如图 5(a) 中所示, 随着 D2D 多播簇半径的增大, 多播簇平均速率亦随之减小; 这是因为多播簇半径的增加将直接导致多播簇中最差信道状态用户的增多, 因此速率也随之减小。

2) 同时, EC 算法可帮助 EH-D2MD 通信场景分析: 在不同多播簇半径下, 能量协作算法的速率逐渐趋于稳定; 该结果为 EH-D2MD 进行簇划分研究时的簇员个数规划提供指导意义; 例如: 当一个 EH-D2MD 多播簇进行多用户能量协作以提升系统鲁棒传输速率时, 多播簇内成员保持在 6 个以上, 才使得多播簇传输速率达到较好值。

3) 如图 5(b) 中所示, EC 算法相比于 without EC 算法而言, 蜂窝下行平均传输速率较低, 且在 3 种不同簇半径场景下, EC 算法得到的复用蜂窝链路下行平均传输速率基本相同。该现象产生原因需参考图 2 的能量协作传输机制。图 2 中无线能量

协作阶段将占用部分蜂窝下行阶段, 此时基站将对多播簇的多用户能量协作产生同频干扰. 为了降低此时的互干扰, 提升多用户能量协作效率, 基站必定降低自身功率, 从而导致下行速率的下降. 因此, 无论在何种簇半径场景下, EC 算法均以确保最差蜂窝下行传输速率需求为前提, 支持多用户能量协作, 最终导致三种簇半径的复用蜂窝链路下行平均传输速率基本相同.

图 6 给出了 EC 算法在不同多播簇半径场景下的能量协作簇员比例分析. 可以发现:

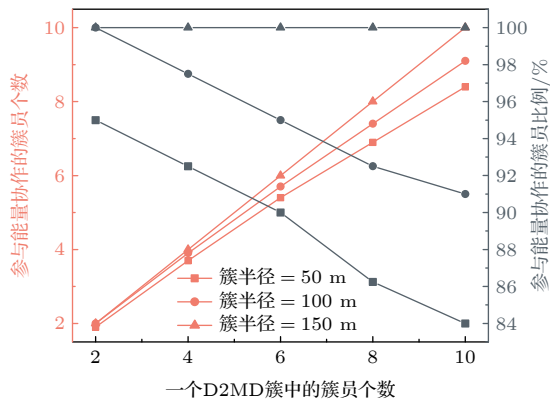


图 6 EC 算法在不同多播簇半径场景下参与能量协作的簇员比例分析

Fig. 6. The proportion of the cluster members participating in energy cooperation of EC algorithm under scenarios with different multicast cluster radius.

1) 多播簇半径越大, 参与能量协作的簇员比例越高; 其原因可同图 5 分析中的 1) 所述, 多播簇半径越大, 用户的信道质量越差, 簇头能耗越大, 越需要簇员进行协作; 当簇半径为 150 m, 簇员个数增加到 10 时, 能量协作的簇员比例仍保持 100%, 说明此场景下信道状态质量较差, 为保障能量受限场景下的 D2MD 传输鲁棒性, 能量协作呈满负荷状态.

2) 同一多播簇半径下, 能量协作的簇员比例随簇员用户数增加而减少; 这是因为当簇员个数不断增加, 复用干扰和最差信道分布趋于稳定, 参与能量协作的簇员个数亦趋于稳定, 簇员比例随之减小.

3) 如簇半径为 50 m 时的性能所示, 簇半径越小, 能量协作的效果越好, 参与能量协作的簇员比例越低; 但大部分 (簇员个数为 10 时参与能量协作的用户比例为 84%) 用户均需参与到能量协作

中来, 其原因在于: a) 大部分用户参与能量协作可保障 EC 机制的公平性; b) 越多用户参与能量协作可保障 EH-D2MD 簇的传输性能.

## 6 总 结

该文针对 EH-D2MD 通信中簇头面临的可用能量缺失和能量消耗需求的矛盾问题, 利用 WPT 技术可控性, 设计了一种簇头到簇员的能量协作传输机制, 以提升能量采集技术约束的多播通信传输鲁棒性. 该文以 EH-D2MD 多播簇传输速率为优化目标, 建立了联合求解频谱资源分配、协作时间规划和功率控制问题. 为给出该问题的联合最优解, 该文提出了一种凸近似下界算法. 通过仿真分析发现, 该算法可得到原问题的近似下界最优解; 同时, 相比于 without EC 机制, 能量协作传输机制将多播簇传输速率提升了 45% 以上. 此外, 本文提出算法可帮助探讨 EH-D2MD 网络的特性, 如: 不同簇员个数中得到的能量协作传输稳定区间, 为多播成簇簇员个数规划提供理论指导意义.

## 参考文献

- [1] Perera T D P, Jayakody D N K, Sharma S K, Symeon C, Jun L 2018 *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **20** 264
- [2] Kusaladharma S, Tellambura C 2017 *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* **2** 87
- [3] Lim D W, Kang J, Kim H M 2019 *IEEE Wireless Commun. Lett.* **8** 1333
- [4] Ying L, Peilin H, Runzhou L 2018 *IEEE Commun. Lett.* **22** 1704
- [5] Bhardwaj A, Agnihotri S 2018 *IEEE Wireless Commun. Lett.* **7** 546
- [6] Zhang G, Yang K, Chen H H 2016 *IEEE Wireless Commun. Lett.* **23** 68
- [7] Gurakan B, Ozel O, Yang J, Sennur U 2013 *IEEE Trans. Commun.* **61** 4884
- [8] Hu J Y 2018 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Hunan University) (in Chinese) [胡瑾瑜 2018 博士学位论文 (长沙: 湖南大学)]
- [9] Hu F, Liu X, Shao M, Dan S, Liheng W 2017 *IEEE Netw.* **31** 90
- [10] Xu J, Zhang R 2015 *IEEE Trans. Veh. Technol.* **64** 2476
- [11] Xie Z W, Zhu Q 2017 *J. on Commun.* **38** 176 (in Chinese) [谢振威, 朱琦 2017 通信学报 **38** 176]
- [12] Ercan A Ö, Sunay O, Akyildiz I. F 2018 *IEEE Trans. Mobile Comput.* **17** 1680
- [13] Ni W, Dong X 2015 *IEEE Trans. Commun.* **63** 1457
- [14] Shin D K, Choi W, Kim D I 2015 *IEEE Trans. Commun.* **63** 4551
- [15] Ammar A, Reynolds D 2018 *IEEE Commun. Lett.* **22** 2128
- [16] Zhao D, Cui Y, Tian H, Zhang P 2019 *IEEE Access* **7** 72316

- [17] Gyawali S, Xu S, Ye F, Hu, Rose Q, Qian Y 2018 *Proceedings of IEEE 87th Vehicular Technology Conference* Porto, Portugal, July 3–6, 2018 p1
- [18] Zeng M, Luo Y, Jiang H, Wang Y J 2022 *Early Access by IEEE Trans. Wireless Commun.*
- [19] Mukherjee M, Shu L, Prasad R V, Wang D, Hancke G P 2019 *IEEE Commun. Mag.* **57** 108
- [20] Papandriopoulos J, Evans J S 2009 *IEEE Trans. Inf. Theory* **55** 3711
- [21] Shahbazian A, Fereidunian A, Manshadi S D 2020 *IEEE Trans. Smart Grid* **11** 5009
- [22] Girão-Silva R, Martins L, Gomes T, Tipper D, Alashaikh A 2019 *Proceedings of IEEE 15th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks* Coimbra, Portugal, March 19–21, 2019 p29
- [23] Boyd S, Boyd S P, Vandenberghe L 2004 *Convex Optimization* (Cambridgeshire: Cambridge University Press)
- [24] Yuille A L, Rangarajan A 2003 *Neural Comput.* **15** 915
- [25] Kronqvist J, Bernal D E, Lundell A, Grossmann I E 2019 *Optim. Eng.* **20** 397
- [26] Fletcher R, Leyffer S 1994 *Math. Program.* **66** 327
- [27] Shin D K, Choi W, Kim D I 2015 *IEEE Trans. Commun.* **63** 4551
- [28] Chen W, Zhao S, Zhang R, Yang, L 2020 *IEEE Internet Things J.* **8** 501

# Wireless power transfer supported device-to-device multicast energy cooperative transmission scheme<sup>\*</sup>

Zeng Min<sup>1)2)</sup> Luo Ying<sup>1)2)†</sup> Jiang Hong<sup>1)2)</sup>

1) (School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

2) (Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, China)

( Received 28 February 2022; revised manuscript received 7 May 2022 )

## Abstract

The cluster heads (CHs) will face the contradiction between the lack of available energy and the demand of high energy consumption in energy harvesting-supported device-to-device multicast communications (EH-D2MD). Wireless power transfer (WPT) technology is a possible way to address the above contradiction. The members of a device-to-device (D2D) multicast cluster can transfer part of their available energy to the CH by WPT and jointly undertake contents unloading. As a result, the transmission robustness of the multicast cluster can be improved. Therefore, a transmission scheme with energy cooperation (EC) is designed on the premise of cellular spectrum reusing. The EC scheme designs elaborately the energy harvesting, energy cooperation and data transmission of the spectrum reusing process. To realize the EC scheme, this work is to maximize the transmission rate of a multicast cluster and give the joint optimal solution of multi-domain resources including spectrum resource allocation, cooperative time factor planning, and power control. The rate maximization problem is a typical non-convex mixed integer non-linear programming (non-convex MINLP) problem. To investigate the performance of EH-D2MD communication scenario, a convex approximate lower-bound algorithm is proposed, which can transfer the non-convex problem into convex MINLP and can give a joint solution. Simulation results show that the proposed algorithm obtains a lower-bound solution of the rate maximization problem in comparison with the exhausted searching method. Furthermore, compared with the scheme without energy cooperation, the established EC transmission scheme can increase the transmission rate of D2MD by more than 45% and enhance the robustness of EH-D2MD.

**Keywords:** energy harvesting, D2D multicast communication, energy cooperative communication, convex approximation algorithm

**PACS:** 88.80.ht, 43.38.Wl, 87.18.Gh

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220345

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61771410), the Sichuan Science and Technology Program (Grant No. 2021YJ0097), and the SouthWest University of Science and Technology Research Fund (Grant No. 18zx7144).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ylo@swust.edu.cn](mailto:ylo@swust.edu.cn)





## 无线能量传输支持的设备到设备多播能量协作传输机制

曾闵 罗颖 江虹

## Wireless power transfer supported device-to-device multicast energy cooperative transmission scheme

Zeng Min Luo Ying Jiang Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 168801 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220345

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220345>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 窄带随机激励双稳压电悬臂梁响应机制与能量采集研究

Mechanism of a nonlinear bistable piezoelectric cantilever beam under narrow-band random excitations and its energy harvesting  
物理学报. 2018, 67(21): 210502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180072>

#### 用于提高微波无线能量传输系统接收端能量转换效率的肖特基二极管

Ge Schottky diode for improving energy conversion efficiency of the receiver of microwave wireless power transfer  
物理学报. 2020, 69(10): 108401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191415>

#### 光合作用多色素捕光模型中光激发对能量传输的影响

Influence of the light excitation on energy transfer in a multi-pigments light-harvesting model of photosynthesis  
物理学报. 2022, 71(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211960>

#### 基于压电驻极体的微能量采集

Research progress of piezoelectrets based micro-energy harvesting  
物理学报. 2020, 69(24): 247701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200815>

#### 人工磁导体对无线能量传输空间场的调控

Regulation of spatial fields in wireless power transfer with artificial magnetic conductor  
物理学报. 2019, 68(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190862>

#### 无线多径信道中基于时间反演的物理层安全传输机制

Secure transmission mechanism based on time reversal over wireless multipath channels  
物理学报. 2018, 67(5): 050201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172134>