

文章编号:2095-6134(2022)01-0119-08

基于 EH 的 D2D 通信中继选择算法*

陈光祖^{1,2,3†}, 黄鑫陈^{1,2}, 谭冲^{1,3}, 卜智勇^{1,3}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国科学院无线传感网与通信重点实验室, 上海 200050)

(2020 年 3 月 17 日收稿; 2020 年 4 月 27 日收修改稿)

Chen G Z, Huang X C, Tan C, et al. Relay selection algorithm based on energy harvest in D2D communication[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(1): 119-126. DOI: 10. 7523/j. ucas. 2020. 0023.

摘要 为了使 D2D 通信高效节能地选择中继节点, 结合能量收集技术和 D2D 技术, 构建一种基于能量收集的 D2D 通信单小区模型, 提出一种基于能量收集的中继选择算法。利用能量收集技术收集设备周围干扰信号携带的能量为中继通信供能, 避免设备因本身剩余能量低于阈值而发生通信中断或选择中继失败。在物理域分析能量收集功率和信道情况; 受人类社会竞选机制启发在备选中继集中由通信 2 个端节点共同投票选择合适中继, 避免中继仅符合某一端节点要求导致整个通信中断。仿真结果表明本文所提算法与结合设备接触和剩余能量的 D2D 中继选择算法相比, 提高了中继选择成功概率、设备生存时间以及系统吞吐量。

关键词 设备到设备通信; 能量收集; 中继选择; 竞选机制

中图分类号: TN912 **文献标志码:** A **DOI:** 10. 7523/j. ucas. 2020. 0023

Relay selection algorithm based on energy harvest in D2D communication

CHEN Guangzu^{1,2,3}, HUANG Xincheng^{1,2}, TAN Chong^{1,3}, BU Zhiyong^{1,3}

(1 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Key Laboratory of Wireless Sensor Networks and Communications, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract In order to select the relay node efficiently and energy-saving for D2D communication, we combine energy harvesting technology and D2D technology, build a D2D homogenous cell model based on energy harvesting, and propose a relay selection algorithm based on energy collection. Using energy harvesting technology to provide relay energy, the node is avoided from communication interruption or selection relay failure due to its low residual energy. Energy harvesting power and channel conditions are analyzed in the physical domain, and the appropriate relay in the alternative relay set is selected by the communication two-end node inspired by the human social campaign mechanism, so as to avoid the interruption of the entire communication caused by the relay meeting only one node requirement. The simulation results show that the algorithm proposed in this paper improves the probability of relay selection success, equipment survival time and system throughput

* 上海市科委科研计划项目(18511106400)资助

† 通信作者, E-mail: guangzu.chen@mail.sim.ac.cn

compared with the prestige-based relay selection algorithm.

Keywords device-to-devicce communication; energy harvest; relay selection; campaign mechanism

随着 5G 的大规模部署使用,海量设备将接入到蜂窝网络,核心网络压力陡增。3GPP (the third generation partnership project) 提出设备到设备通信 (device-to-device, D2D), 服务于近距离场景^[1]。即终端间建立直接通信链路,数据无需经过核心网络的基础设施节点,能够有效降低核心网流量压力^[2]。同时,D2D 网络被认为是更广泛的 IoT (internet of things) 概念的一部分,D2D 网络部署应与绿色 IoT 的未来概念兼容^[3]。

由于应用于 5G 的移动终端的发射功率进一步提升,电池容量限制对网络可持续性的影响越来越大,节能通信协议的发展越来越受到科学界的重视^[4]。文献[5]提供了为低能耗无线通信设备供电的思路,即使用能量收集技术 (energy harvest, EH) 从非传统来源 (例如环境干扰) 中获取能量。文献[6]考虑在多通道蜂窝网络下进行的 D2D 通信,从周围干扰中收集到的射频 (radio frequency, RF) 能量是为 D2D 发射机供电的唯一来源,验证了将射频能量收集应用于短距离 D2D 通信可提高网络的能量效率。同时,由于 5G 基站的分布密度越来越大,小区内的设备越来越多,设备能够收集的能量也越来越可观。利用环境中的无线电波能量作为设备能源是潜在的研究领域,需要进一步研究^[7]。

由于 D2D 通信应用于短距离通信,覆盖面积较小,建立 D2D 直连通信对通信链路质量要求较高,有学者提出采用多跳通信模式,即通过中继选择算法选择合适的节点进行 D2D 中继通信^[8]。文献[9-11]讨论了几种中继选择算法。如文献[9]结合中继选择和资源分配,提出一种使链路容量最大化的中继选择算法;文献[10]提出基站辅助的随机中继选择算法,在最小化跳数的同时减少对蜂窝用户造成的干扰,提高频谱效率;文献[11]研究联合中继选择以及相关子信道和功率分配问题,设计了一种迭代匈牙利方法 (iterative Hungarian method, IHM), 获得了接近最优的性能。

在基于 EH 的 D2D 通信方面,文献[12]提出一种先收集后传输的模型,通过功率控制最大化吞吐量;文献[13]提出一种 D2D 发射机辅助合作协议 (DTAC), 使空闲 D2D 发射机收集来自自主发

射机的能量,作为中继改善主网络的通信,最佳传输功率来最大化 D2D 网络吞吐量;文献[14]研究基于能量收集的蜂窝通信,提出一种利用 D2D 中继通信协助能量不足的蜂窝设备完成数据传输。

以上文献分别对 D2D 中继选择算法或基于 EH 的 D2D 通信进行了研究,但是综合两方面的整体研究,即有关基于能量收集的 D2D 通信中继选择算法的研究仍然较少。基于此,本文首先从物理域分析中继节点的能量收集模型和通信链路质量;受人类社会竞选机制启发,将中继的能量收集功率和传输速率打包为竞选数据,由 D2D 通信两端节点共同投票,提出一种基于能量收集的 D2D 通信中继竞选算法 (energy harvesting-based relay selection algorithm, EHRSRA)。仿真结果表明,能量收集技术与 D2D 中继通信相结合获得了更好的系统吞吐量、中继选择成功概率以及更长的设备工作时间。

1 系统模型

系统模型如图 1 所示,考虑一个单小区,其中包括一个基站 BS (base station) 和 M 个移动设备。每个移动设备都具有蜂窝通信接口和 D2D 通信接口,可以根据需求在基站的控制下选择蜂窝通信、D2D 直连或 D2D 中继 3 种通信模式,因此移动设备有 3 个工作状态:蜂窝通信状态 (cellular communication status, CCS)、D2D 通信状态 (D2D communication status, DCS)、中继通信状态 (relay communication status, RCS) 以及一个空闲状态 (free status, FS)。同时设备均安装有无线能量收集装置,可以收集周围干扰信号携带的能量。移动设备本身的能源仅在设备处于 CCS 和 DCS 时被使用,当用户处于 RCS 时不消耗自身携带的能量,转而启用无线能量收集装置收集能量供该状态使用。

当通信需求产生后,可根据模式选择算法选择合适的通信模式^[15]。本文主要研究当基站为某次通信选择 D2D 中继模式后的中继选择算法。图 1 中,移动设备 D1 和 D2 之间的通信方式被选定为 D2D 中继通信模式。D1 和 D2 之间符合条件的 FS 移动设备成为本次通信的备选中继集,从中选出一个最优中继 R 建立一条两跳传输路径。

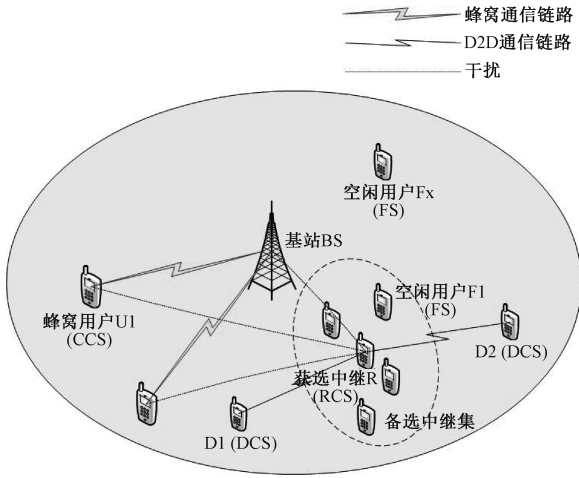


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

为达到节省频谱资源的目的,本模型中 D2D 通信以复用模式 (underlay) 的方式与蜂窝通信共存^[2],共享一组正交信道集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_d, \dots, C_{|C|}\}$, $|C|$ 表示集合 C 的势。信道集合分为 2 个子集 C_U 和 C_D , 分别提供给上行链路和下行链路使用。BS 可以根据服务将正交信道集合 C 中所有子信道提供给蜂窝用户使用,但 D2D 通信只能在 C_d 上进行^[6]。假设信道随机分配给蜂窝用户使用,则当蜂窝用户数小于 $|C| - 1$ 时, C_d 有可能被 D2D 通信独占,这种情况下 D2D 通信不会受到同频干扰;但也可能 C_d 被蜂窝用户使用, D2D 通信以复用模式共享该信道,由于采用复用模式的网络架构, D2D 通信过程中会受到蜂窝通信的同频干扰。当蜂窝用户数大于 $|C| - 1$ 时, C_d 一定会被蜂窝用户占用, D2D 通信以复用模式共享该信道,通信过程中也会受到蜂窝通信的同频干扰。

2 中继选择算法

2.1 物理域分析

考虑一个简单的两跳 D2D 通信过程,产生 D2D 通信需求的两台移动设备工作状态选择为 DCS,标记为 D2D 收发机 D_1 和 D_2 。其余设备状态为 CCS 或 FS。最终被选中的中继节点状态为 RCS,标记为中继 R。

2.1.1 能量收集

处于 RCS 的中继 R 启用无线能量收集装置收集周围一定范围内的 RF 能量,转换为 R 的中继发射功率。我们考虑一个瑞利衰落信道环境,路径损耗因子表示为 α 。文献[6]将位于 y 的中

继节点能量收集功率表示为

$$P_H = \tau \sum_{c \in C_D} P_B h_x \|x - y\|^{-\alpha} + \tau \sum_{c \in C_U} \sum_{u_i \in \tilde{\Phi}U(c)} P_C h_{u_i} \|u - y\|^{-\alpha}, \quad (1)$$

其中:基站发射功率为 P_B , 蜂窝用户功率为 P_C , τ 为设备能量收集效率, h_x 和 h_{u_i} 分别为基站到中继和不同蜂窝用户到中继的信道增益, x, u 分别为基站和蜂窝用户 u_i 的位置, $c \in C_U$ 和 $c \in C_D$ 分别表示属于上行信道子集或下行信道子集的信道, $u_i \in \tilde{\Phi}U(c)$ 表示在信道 c 上的蜂窝用户。公式的第 1 部分表示设备收集基站发射的下行链路信号的能量,第 2 部分表示设备收集蜂窝通信用户发射的上行链路信号的能量。

当中继与端节点位置固定时,它们之间的距离 d_0 是已知参量。设 D2D 接收器的灵敏度为 ρ_D , 中继节点的发射功率要求^[6]表示如下

$$P_R \geq \rho_D d_0^\beta. \quad (2)$$

本系统模型中,我们把节点收集的能量作为 RCS 时的唯一能量来源。所以 P_R 受到能量收集功率 P_H 的约束,设 P_H 的转化效率为 η , 则 P_H 应满足

$$P_H \geq \frac{\rho_D d_0^\beta}{\eta}. \quad (3)$$

2.1.2 中继传输速率

本模型中 D2D 通信以复用模式的方式与蜂窝通信共享频谱资源, D2D 通信在通信过程中受到来自蜂窝通信的同频干扰。考虑在一次双向通信过程中, D2D 接收机 $D_j (j = 1, 2)$ 在接收中继 R_i 转发信号分别受到来自蜂窝上行用户 $U_z (z = 1, 2)$ 的同频干扰,因此端节点 D_j 接收到的信干噪比^[16]分别表示为

$$\text{SINR}_{R_i D_j} = \frac{P_{R_i} h_{R_i D_j}}{P_{U_z} h_{U_z D_j} + \sigma^2}, \quad (4)$$

其中: P_{R_i}, P_{U_z} 分别表示中继 R_i 、蜂窝用户 U_z 的发射功率, σ^2 为加性高斯白噪声, $h_{R_i D_j}, h_{U_z D_j}$ 分别为中继 R_i 到端节点 D_j 的信道增益、蜂窝用户 U_z 到端节点 D_j 的信道增益。

根据香农公式,中继 R_i 到端节点 D_j 的传输速率为

$$R_{R_i D_j} = B \log_2 (1 + \text{SINR}_{R_i D_j}), \quad (5)$$

同理,端节点 D_j 到中继 R_i 的传输速率可以表示为

$$R_{D_j R_i} = B \log_2 (1 + \text{SINR}_{D_j R_i}), \quad (6)$$

其中 B 表示信道带宽。

因此由 D2D 接收机 $D_j (j = 1, 2)$ 和中继 R_i 组成的双向中继通信的传输速率表示为

$$R_{\overline{D_1 R_i D_2}} = \min(R_{R_i D_j}, R_{D_j R_i}). \quad (7)$$

2.2 中继选择

2.1 节分析了基于能量收集的 D2D 中继节点物理属性。考虑到移动设备的计算能力以及中继传输时延等通信质量要求, D2D 通信中继选择应使用复杂度较低算法。本部分结合人类社会竞选机制提出一种中继选择算法。

人类社会竞选机制可以简述如下: 多个竞选人参与职位竞选, 竞选人对一定范围内的选民产生影响。选民手中握有一定的选票, 同时受到多位竞选人的影响。竞选人的能力越大, 对选民产生的影响就越大, 可能获取的选票就越多。

在本文中, 我们可以认为中继备选集中的节点是竞选人角色, 产生 D2D 通信需求的 2 个端节点是选民角色。备选中继集中获得 2 个端节点更多选票的节点即为本次通信的获选中继节点。在传输过程中, 用户的邻居节点可以直接接收和转发数据, 而非邻居节点则需要通过邻居节点的数据中继和转发获得完整数据包, 以实现信息传输和数据共享^[16]。本模型中备选中继集由 2 个端节点的共同邻居节点组成, 可以认为所有的备选中继均可以和 2 个端节点建立可靠的链接以发送简单控制信息, 这一原则保证了备选中继的竞选数据可以发送给 2 个端节点。同时在竞选过程中参考第一密封报价拍卖机制, 假设设备在提交数据时是可信的, 在竞选中继开始时所有备选节点分别向 2 个端节点发送竞选数据。这里, 将上节获得的能量收集功率 P_H 和传输速率 $R_{\overline{D_1 R_i D_2}}$ 打包为竞选数据:

$$\omega_i = (P_{H_i}, R_{\overline{D_1 R_i D_2}}), \quad (8)$$

D_1 和 D_2 分别对获取到的竞选数据集集合进行投票。

要求端节点对同一参数使用同样的投票系数设计原则, 且规定投票规则在一开始就是全局已知的, 参与 D2D 通信的所有设备均默认认可该规则, 本节设置端节点对单位传输速度的投票规则 a 和对能量收集功率 P_H 的投票规则 b 如下:

端节点根据不同业务需求对 SINR 的要求, 设置对中继节点的基准传输速率 R_{RD}^0 。我们认为低于 R_{RD}^0 的传输速度不能够达到通信要求, 因此在这种情况下 $a = 0$; 达到基准传输速率即可获得

基础投票结果 1。同时为了限制备选中继节点因传输速率较高使得该因素影响较大, 对于传输速度 $R_{\overline{D_1 R_i D_2}}$ 设置如下投票规则:

$$a_{ij} = \begin{cases} \ln\left(\frac{R_{\overline{D_1 R_i D_2}}}{R_{RD}^0} - 1 + e\right), & R_{RD}^0 \leq R_{\overline{D_1 R_i D_2}}, \\ 0, & R_{RD}^0 > R_{\overline{D_1 R_i D_2}}. \end{cases} \quad (9)$$

根据式 (3) 要求, 将中继节点的能量收集功率要求置为

$$P_H^0 = \frac{\rho_{D_j} d_0^\beta}{\eta}. \quad (10)$$

同理对能量收集功率 P_H 的投票规则设计如下:

$$b_{ij} = \begin{cases} \ln\left(\frac{P_{H_i}}{P_H^0} - 1 + e\right), & P_H^0 \leq P_{H_i}, \\ 0, & P_H^0 > P_{H_i}. \end{cases} \quad (11)$$

在人类社会竞选机制中, 由于选民对竞选人的期待不一, 竞选人的不同特质对不同选民所产生的影响程度也是不同的。根据上述规则, 备选节点 R_i 分别从端节点 D_1 和 D_2 获得投票:

$$(\theta_1 a_{i1}, (1 - \theta_1) b_{i1}), \quad (12a)$$

$$(\theta_2 a_{i2}, (1 - \theta_2) b_{i2}), \quad (12b)$$

其中: θ_1, θ_2 的取值范围为 $(0, 1)$, 分别表示端节点 D_1 和 D_2 对传输速度参数的关注指数, 数值越大表明该节点在本次中继选择中更关注该参数。同理, $(1 - \theta_1)$ 和 $(1 - \theta_2)$ 表示端节点 D_1 和 D_2 对能量收集功率参数的关注指数。因此备选节点 R_i 获得的票数集合为 $(\theta_1 a_{i1} + \theta_2 a_{i2}, (1 - \theta_1) b_{i1} + (1 - \theta_2) b_{i2})$ 。

本模型在选择中继节点时根据通信要求在 2 个因素中做出权衡。因此, 我们考虑在中继选择中实现最大总和传输速率和最大能量收集功率 2 种情况, 提出 2 个中继选择策略: 传输速率和最大中继选择策略 MSR-RSS (maximum sum-rate relay selection strategy) 和能量收集功率最大中继选择策略 MEH-RSS (maximum energy-harvest relay selection strategy)。

MSR-RSS 要求基站在收到来自端节点 D_1 和 D_2 的投票指标集合后, 以获得最大和传输速率投票指标为目标进行中继节点的选择, 问题描述为

$$R_i^{\text{MSR-RSS}} = \max R^{\text{SUM}}. \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \prod_{i,j=1,2} b_{ij} > 0.$$

其中 $R_i^{\text{MSR-RSS}}$ 表示依据 MSR-RSS 要求选择的中继。

MEH-RSS 要求基站在收到来自端节点 D_1 和 D_2 的投票指标集合后,以获得最大能量收集功率投票指标为目标进行中继节点的选择,问题描述为

$$R_i^{\text{MEH-RSS}} = \max P_H.$$
$$\text{s. t. } \prod_{i,j=1,2} a_{ij} > 0.$$

(14)

其中 $R_i^{\text{MEH-RSS}}$ 表示依据 MEH-RSS 要求选择的中继。

- 算法功能描述如下:
- 步骤 1) 基站检查 D_1 和 D_2 邻居节点流表,通知空闲状态的 D_1 和 D_2 的共同邻居节点竞选中继并生成中继备选集;
- 步骤 2) 备选中继节点收到通知后计算能量收集功率 P_H 和传输速率 $R_{\overline{D_1 R_1 D_2}}$,生成竞选数据集发送给端节点 D_1 和 D_2 ;

步骤 3) D_1 和 D_2 根据式 (9)、式 (11)、式 (12a)、式 (12b) 分别对获取到的竞选数据集集合投票,并将投票结果集合发送给基站;

步骤 4) 基站选择 MSR-RSS 或 MEH-RSS 进行中继节点选择,并通知 D_1 、 D_2 和获选中继 R 3 台设备建立通信链路;如果选择失败,则通知 D_1 和 D_2 进行蜂窝通信。

3 仿真分析

基于 MatLab 平台进行对算法进行仿真实验,主要参数设置如表 1 所示。本文所提基于能量收集的 D2D 中继选择算法 EHRSA 与结合设备接触和剩余能量的 D2D 中继选择算法 PRSA (prestige-based relay selection algorithm)^[17] 以及 D2D 直连通信做仿真对比。

图 2(a) 表示 3 种中继选择模式和 D2D 直连通信随蜂窝用户数量变化下的 10 对 D2D 通信对的吞吐量。仿真设置空闲用户数为 50,设置 θ_1 和 θ_2 取值均为 0.5, P_H^0 为 15 dBm。可以看出,随着蜂窝用户数量增加 PRSA 和 D2D 直连通信的吞吐量基本未发生变化。但是当蜂窝用户数超过小区信道数后,由于 C_d 一定会被分配给蜂窝用户使用,D2D 通信不再拥有独立使用该信道的机会,导致吞吐量略微降低。对于本文算法,虽然随着用户数量的不断提升 D2D 用户独占 C_d 的概率在降低,但是由于中继能够收集的能量也在增加,所

表 1 主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters

参数	参数值
小区半径/m	500
系统带宽/MHz	40
信道带宽/kHz	180
基站传输功率/dBm	46
CCS 传输功率/dBm	23
DCS 传输功率/dBm	20
D2D 接收器灵敏度 ρ_D /dBm	-50
蜂窝路径损耗系数 α	2
D2D 路径损耗系数 β	3
高斯白噪声/(dBm/Hz)	-174
基准传输速率 R_{RD}^0 /(Mb/s)	1
能量收集功率阈值 P_H^0 /dBm	15
CCS 用户数	[0,200]
空闲用户数	[0,200]
DCS 用户对	10
能量收集效率 τ ^[18]	0.7
转化效率 η	0.8
设备初始能量范围/Wh	[0,2]
能量中断阈值/Wh	0.3

以在蜂窝用户数量不超过信道数量时,EHRSA 的吞吐量随着蜂窝用户数量的增多而增大。但是当蜂窝用户数量超过蜂窝数量以后,D2D 通信复用 C_d 受到的干扰不断增大,D2D 通信对的平均 SINR 不断降低导致系统吞吐量有所降低。事实上,中继传输功率受到设备能力制约不可能无限制提高,仿真中设置中继传输功率上限为 25 dBm^[19]。仿真结果表明由于 MSR-RSS 比 MEH-RSS 更加倾向选择传输速率较快的节点,所以吞吐量高 10%~20%左右。同时可以看出在蜂窝用户数量较少时,中继节点依靠能量收集转化的发射功率低于对比算法的固定发射功率,导致 EHRSA 的吞吐量低于对比算法 PRSA。但是蜂窝用户数量增多后 EHRSA 能够获得更高的无线能量收集功率转化为 DCS 的发射功率,因此 2 种模式的吞吐量都显著高于对比算法,在图 2(a)中显示为 2 个交叉点。当蜂窝用户达到 200 时,EHRSA (MSR-RSS) 比 PRSA 的吞吐量高出 37.9%。所以,本文提出的算法在用户密集的环境中更具有优势。但是当蜂窝用户数量超过信道数量造成小区通信拥堵时,本文算法也受到一定影响,造成吞吐量略微下降。

图 2(b)表示了吞吐量随空闲中继数量的变化,仿真设置蜂窝状态用户数量为 200。可以看出这种情况下,MSR-RSS、MEH-RSS、PRSA 的吞吐量都随着空闲用户数量增加而升高。这是因为

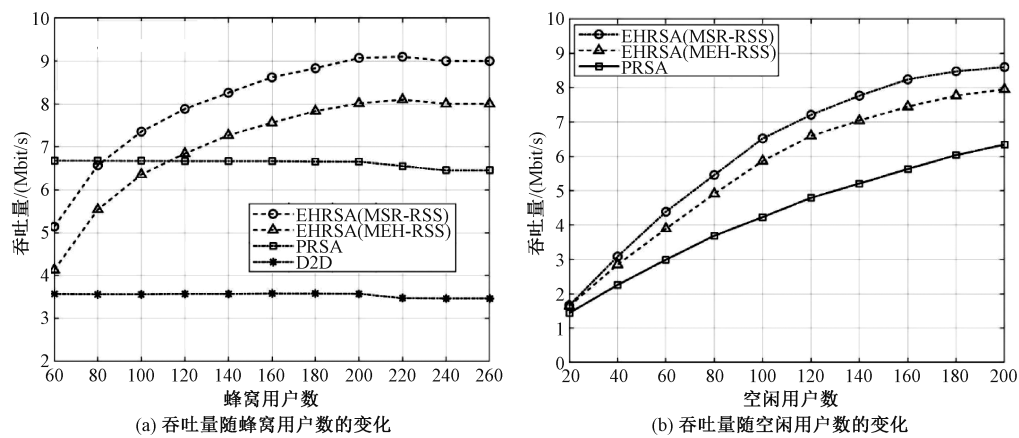


图 2 系统吞吐量分别随蜂窝用户数、空闲用户数的变化

Fig. 2 Diagram of throughput varying with the number of CCS users and the number of FS user

随着空闲用户数量的提高,空闲用户分布在 D2D 通信对之间的概率增大,成功选中中继的概率和选到更快传输速率的节点概率也相应提高。同时,因为在蜂窝状态用户数量为 200 的条件下 EHRSA 的中继发射功率已经占据优势。所以在空闲用户数较低的阶段,MSR-RSS、MEH-RSS 的吞吐量已经略微高于 PRSA 的吞吐量。并且由于设备本身的能量储备已经不是限制中继选择的因素,本文算法的优势随着空闲用户数的增多而不断增大,例如在空闲用户数达到 200 时,MSR-RSS 的吞吐高出 PRSA 的吞吐量约 30%。

上文仿真将端节点对传输速度参数和能量收集功率参数的关注指数 θ_1 和 θ_2 取值均设置为 0.5,以表示端节点对 2 个参数无偏好的情况。为考察 θ_1 和 θ_2 取值对算法性能的影响,设置 θ_1 和 θ_2 取值为 (0.3, 0.3)、(0.7, 0.7)、(0.3, 0.7) 和

(0.7, 0.3) 4 种情况进行仿真,其余参数设置不变。如图 3(a) 所示,当 θ_1 和 θ_2 取值为 (0.7, 0.7),即两端节点更关注传输速度参数时,MSR-RSS 获得了最大的吞吐量;相反,当 θ_1 和 θ_2 取值为 (0.3, 0.3),即两端节点更关注传输无线能量收集功率时,MEH-RSS 获得了最大的吞吐量。这说明当 2 个端节点的倾向一致时,系统更易获得高吞吐量;且基站在进行策略选择时应充分考虑端节点的倾向。从整体上看,MSR-RSS 比 MEH-RSS 在吞吐量参数上更占优势。图 3(b) 可以看出 MSR-RSS 和 MEH-RSS 均是在 θ_1 和 θ_2 取值为 (0.3, 0.3) 时获得最低中继节点断电概率,这是本文模型引入无线能量收集所带来的收益,两端节点共同关注该参数时,中继节点的断电概率降到最低。但从整体上看,MEH-RSS 比 MSR-RSS 在中继节点断电概率参数上更占优势。

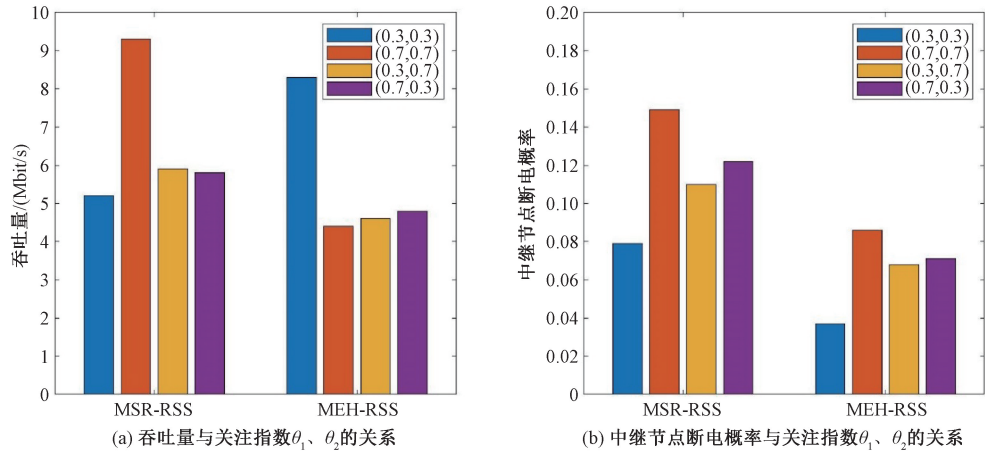


图 3 2 种模式下吞吐量、中继节点断电概率与关注指数 θ_1 、 θ_2 的关系

Fig. 3 Relationship between throughput, the probability of interruption of power supply of relay nodes and attention index θ_1 , θ_2 in two modes

图 4 展示了中继选择成功概率随空闲用户数的变化。仿真设置蜂窝状态用户数量为 200。由

于 EHRSA 中引入无线能量收集技术使部分低电量的节点可以担任中继节点,所以本文所提算法在中继选择成功概率在空闲用户数较少时就占据了较大优势。同时由于在用户密集的环境中,设备能量收集功率更易达到要求,该参数对中继选择的影响在降低,所以 MSR-RSS 的性能优于 MEH-RSS。随着空闲中继的增多,3 种模式的中继选择成功概率均有提升,但是由于 PRSA 要求筛选掉一部分的低电量中继节点,所以该算法的中继选择成功概率一直低于本文提出的 2 种模式。

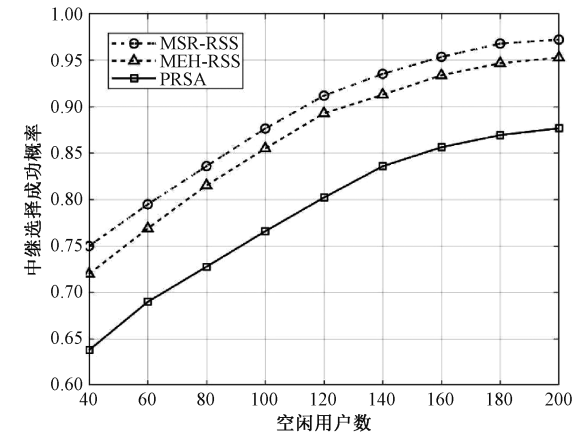


图 4 中继选择成功概率随空闲用户数的变化

Fig. 4 Change of the success probability of relay selectin with the number of FS users

如图 5 所示,对设备平均剩余能量随时间的变化进行仿真,设置设备状态处于 CCS、DCS、RCS 的时间分别为 40%、40%、20%。仿真结果显示,由于能量收集技术引入 D2D 中继选择,设备的能量消耗被极大减缓,有效延长了设备使用时长。显而易见,工作时间越长,本文模型中设备在存活率方面更占据优势,更不易因设备能量问题导致中继选择失败。由于 MEH-RSS 更关注中继节点的能量收集能力,所以比 MSR-RSS 更适用于长时间工作的系统中。同时注意到在图 2(a)的仿真中 MSR-RSS 比 MEH-RSS 吞吐量高 10%~20% 左右。本次仿真表明采用 MSR-RSS 比 MEH-RSS 在设备工作 2 h 后多消耗约 0.1 Wh 的能量,约占总能量的 5%。结合图 3(a)仿真结果分析得出,除非 2 个端节点都倾向选择能量收集功率较高的节点时 MEH-RSS 的吞吐量高于 MSR-RSS,其余情况 MSR-RSS 均比 MEH-RSS 吞吐量高。因此,我们认为当系统持续工作时间不长、端节点不倾向选择能量收集功率时,MSR-RSS 更适合被选用,

能够在提升网络可持续的同时保证系统吞吐量不被降低,较好地平衡了设备寿命和系统吞吐量。

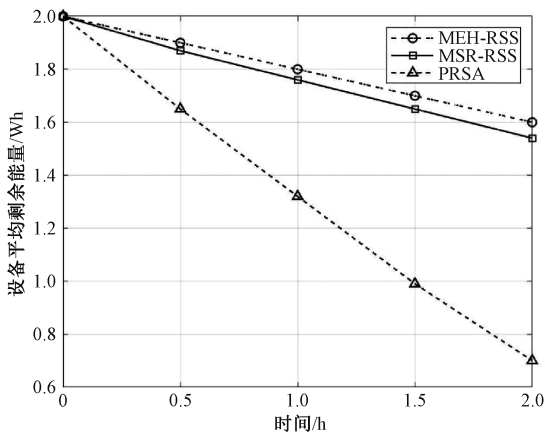


图 5 设备平均剩余能量随时间的变化

Fig. 5 Diagram of equipment average remaining energy varying with time

4 总结

在 D2D 通信中继选择问题中,造成选择失败的原因通常包括设备剩余能量和信号传输速率。针对此问题,本文结合能量收集技术和 D2D 中继技术,提出一种基于能量收集的 D2D 中继选择算法,让中继节点使用能量收集技术获得的能量进行传输。同时,本文考虑 D2D 通信双方对中继节点的选择分歧,提出由双方共同投票选择中继,使中继选择更加合理。仿真分析表明在高密度蜂窝小区内,本文算法在系统吞吐量、中继选择的成功率和设备生存时间具有优势。可以预见,5G 网络中小区内设备密度、基站和设备发射功率都将进一步提高,能量收集技术与 5G D2D 通信的结合应用更具现实意义,EH 在 5G 网络中保证网络可持续性的作用应当获得更多研究。

参考文献

[1] Lin X Q, 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.

[2] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49.

[3] Zhu C S, Leung V C M, Shu L, et al. Green internet of things for smart world[J]. IEEE Access, 2015, 3: 2151-2162.

[4] Ansari R I, Hassan S A. Opportunistic large array with limited participation; an energy-efficient cooperative multi-hop network [C] //2014 International Conference on Computing,

Networking and Communications (ICNC). February 3-6, 2014, Honolulu, HI, USA. Hawaii: IEEE, 2014: 831-835.

[5] Harb A. Energy harvesting: state-of-the-art [J]. Renewable Energy, 2011, 36(10): 2641-2654.

[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.

[7] Ansari R I, Chrysostomou C, Hassan S A, et al. 5G D2D networks: techniques, challenges, and future prospects [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3970-3984.

[8] Alkurd R, Shubair R M, Abualhaol I. Survey on device-to-device communications: challenges and design issues [C] // 2014 IEEE 12th International New Circuits and Systems Conference(NEWCAS). June 22-25, 2014. Trois-Rivieres QC, Canada. IEEE, 2014: 361-364.

[9] 敖松林. 蜂窝网络下基于 D2D 的 Relay 技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.

[10] 顾闻. 基于 D2D 的中继选择算法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

[11] Kim T, Dong M M. An iterative Hungarian method to joint relay selection and resource allocation for D2D communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 625-628.

[12] 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.

[13] Yao Y Y, Huang S, Beaulieu N C, et al. Cooperative transmission in cognitive and energy harvesting-based D2D networks [C] // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). March 19-22, 2017, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2017: 1-6.

[14] Li R Z, Hong P L, Li D F, et al. Energy harvesting-based D2D relaying achieving energy cooperation underlaying [C] // ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). May 20-24, 2019, Shanghai, China: IEEE, 2019: 1-7.

[15] Zhou H, Ji Y S, Li J, et al. Joint mode selection, MCS assignment, resource allocation and power control for D2D communication underlaying cellular networks [C] // 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). April 6-9, 2014, Istanbul, Turkey. IEEE, 2014: 1667-1672.

[16] 马克, 吴洋. 一种基于簇内中继转发的 D2D 协作通信算法 [J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(1): 48-52, 57.

[17] 王汝言, 缪懿, 闫俊杰. 一种结合威望的 D2D 通信中继选择算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(1): 76-82.

[18] 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.

[19] 钱志鸿, 胡良帅, 田春生, 等. 基于非均衡求解的 D2D 多复用通信资源块分配算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2810-2816.