

蜂窝网络中设备间中继的功率分配

裴仁超¹, 李莉^{1*}, 沈一豪¹, 张道煦¹, 罗汉文^{1,2}

(1 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 在蜂窝网络中, 部署了一个设备间(D2D)双向中继网络. 每个D2D双向中继节点配备有两根收发天线, 分别同时与基站和D2D接收端进行通信. 在假设D2D双向中继采用放大转发模式条件下, 提出了优化D2D双向中继网络的功率分配方案. 仿真结果显示: 所提方案的D2D双向中继网络的吞吐量在理想信道下, 较随机功率分配和传统通信方式分别提升7%和12%.

关键词: 设备间中继; 双向中继; 功率分配; 吞吐量

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2017)01-0033-04

Power allocation of two-way device-to-device relays underlay cellular network

Pei Renchao¹, Li Li^{1*}, Shen Yihao¹, Zhang Daoxu¹, Luo Hanwen^{1,2}

(1. College of information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, we assume that a device-to-device (D2D) bidirectional relay network is deployed in a cellular network. Each D2D two-way relay is equipped with two transmit antennas, which are respectively carried out at the same time with base station and receiver. Under the assumption that D2D two-way relay adjust power transmission amplification, we propose a power allocation scheme of the two-way relay network. The simulation results show that the scheme proposed can obtain larger two-way relay network throughput than the random power allocation and the traditional communication methods.

Key words: device-to-device relays; two-way relay; power allocation; throughput

0 引言

移动通信的飞速发展使带宽需求急剧增加, 目前有限的频谱资源已无法满足需要. Device-to-device (D2D)通信是一种设备之间不经过基站(BS)的转接而直接进行通信的技术^[1]. D2D通信技术的引入增加了频谱效率, 节省了设备功耗, 还能扩大蜂窝网的覆盖范围^[2]. 然而, D2D通信技术对蜂窝网络产生

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61503251)

作者简介: 裴仁超(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事移动通信方面的研究. E-mail: pre_yjs@163.com

导师简介: 罗汉文(1949-), 男, 教授, 主要从事移动通信的教学与研究工作. E-mail: hwluo@sjtu.edu.cn

* 通信联系人. E-mail: lilyxuan@shnu.edu.cn

的干扰很大程度上限制了其发展. 利用有限的频谱资源, 引入 D2D 中继(D2DR), 可以在干扰可接受的情况下提高系统吞吐量. D2D 双向中继扩大了蜂窝网络的覆盖范围, 增加了频谱利用率, 它广泛应用于当今无线通信系统中. 将功率分配应用于 D2D 双向中继端是进一步提升系统吞吐量的有效方法.

Qin 等^[3]在单向的 D2D 通信中继网络中, 考虑信道估计的不准确性, 针对不同 D2D 通信传输组设计了不同的中继稳健性波束成形算法, 降低了系统的功率损耗. Wang 等^[4]利用功率分配算法, 在双向中继场景中减小了 D2D 通信用户中断概率. 但是, 在 D2D 通信用户中断概率最小化的同时, 主用户将会受到更大的干扰. Jayasinghe 等^[5]提出了一种联合的物理层网络预编码解码方案, 降低了信号传输的误码率. 但是在多层网络共存的情况下没有考虑层与层之间的干扰. Pei 等^[6]在 D2D 通信与双向蜂窝网络共存的场景中提出了一种频谱共享策略, 提高了蜂窝网络和 D2D 网络的和速率. 通过减小基站和蜂窝用户的传输功率来降低 D2D 通信链路受到的干扰, 忽略了基站和蜂窝用户传输功率的限制条件. 本文作者在一个双向的中继网络中, 通过双向中继端调整功率分配因子, 在保证双向中继端功率不变的条件下使双向中继网络的吞吐量最大化.

1 系统模型

图 1 为研究场景的系统模型示意图, 在蜂窝网络覆盖范围之内有一个基站(BS), 有一个 D2D 通信用户(DU)以及一个配备有两根空间独立的收发天线的 D2D 双向中继节点, 均处于工作状态. 系统中的通讯信息传输分为两个时隙. 第一个时隙, 基站将信号 S_1 发送给 D2DR, 同时 DU 将信号 S_2, S_3 发送给 D2DR. 其中 S_1 是 BS 发送的蜂窝下行信号, S_2 是 DU 发送的蜂窝上行信号, S_3 是 DU 发送给 D2DR 的常规 D2D 通信信号, 如图 1(a) 所示.

在第二个时隙中, D2DR 将在第一个时隙接收到的上行信号 S_2 转发给 BS, 将在第一个时隙接收到的下行信号 S_1 转发给 DU. 同时 D2DR 将常规 D2D 信号 S_4 发送给 DU, 完成 D2DR 和 DU 之间的常规 D2D 通信. 对于信号 S_1 和 S_2 , D2DR 起放大转发作用, 信号 S_3 和 S_4 则是 D2DR 和 DU 之间的常规 D2D 通信, 并且满足 $E(SS^*) = 1$, 其中 $E(\cdot)$ 是数学期望, 如图 1(b) 所示.

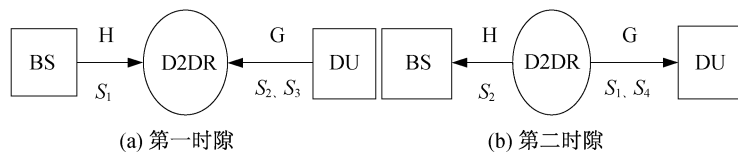


图 1 系统模型示意图

在第一时隙, BS 和 DU 将信号发送至 D2DR, 双向中继节点接收到的信号为:

$$\mathbf{y}_R = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}_1 + \mathbf{G} \cdot (\mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3), \quad (1)$$

式中 \mathbf{H}, \mathbf{G} 分别为 BS、D2DR 之间以及 DU、D2DR 之间的信道响应. 在第二个时隙, 基站端和 DU 端接收到的信号分别为:

$$\mathbf{y}_B = \mathbf{GH} \cdot \mathbf{S}_2 + \mathbf{n}_B, \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_D = \mathbf{HG} \cdot \mathbf{S}_1 + \mathbf{GG} \cdot \mathbf{S}_4 + \mathbf{n}_D, \quad (3)$$

式中 \mathbf{y}_B 为基站端的接收信号, \mathbf{y}_D 为 D2DR 端的接收信号, \mathbf{n}_B 为基站端的接收噪声, \mathbf{n}_D 为 DU 端的接收噪声.

2 D2DR 的功率分配方案

假设在第二个时隙, D2DR 能自动利用功率分配因子 α 来调整向基站和 D2D 用户端发送信号的发射功率. D2DR 总的发射功率为 P_R , 将其 α 部分的功率作为向 BS 端的发射功率, 剩下的 $1 - \alpha$ 部分作为向 DU 端的发射功率. 第二时隙, BS 接收到的来自 DU 在第一时隙发送至 D2DR 的上行信号为:

$$\mathbf{S}'_2 = \sqrt{\alpha} \cdot \mathbf{S}_2. \quad (4)$$

第二时隙, DU 接收到的来自 BS 在第一时隙发送至 D2DR 的下行信号为:

$$\mathbf{S}'_1 = \sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{S}_1. \quad (5)$$

因此在第二个时隙, 基站端和 DU 端接收到的信号表达(2), (3)式分别重新写为:

$$\mathbf{y}_B = \sqrt{\alpha} \cdot \mathbf{GH} \cdot \mathbf{S}_2 + \mathbf{n}_B, \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_D = \sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{HG} \cdot \mathbf{S}_1 + \mathbf{GG} \cdot \mathbf{S}_4 + \mathbf{n}_D. \quad (7)$$

在第二个时隙, 经过 D2DR 端功率分配因子 α 的调整后, D2DR 向 BS 和 DU 分配的发射功率分别为:

$$P_{RB} = E(\|\mathbf{y}_B\|^2) = \text{Tr}(\alpha \cdot \mathbf{GHH}^T \mathbf{G}^T + \sigma_B^2), \quad (8)$$

$$P_{RD} = E(\|\mathbf{y}_D\|^2) = \text{Tr}[(1 - \alpha) \cdot \mathbf{HGG}^T \mathbf{H}^T + \mathbf{GGG}^T \mathbf{G}^T + \sigma_D^2], \quad (9)$$

式中 σ_B^2 和 σ_D^2 分别是 BS 端和 DU 端的接收噪声功率, $E(\mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^*) = \sigma_i^2$, $\text{Tr}(\cdot)$ 是矩阵的迹, $\|\cdot\|$ 是范数. 根据需要优化双向中继网络的吞吐量:

$$\max_{\alpha} (R_{DB} + R_{DD}), \text{ s. t. } P_{\min} \leq P_{RB} \leq P_{\max}, P_{\min} \leq P_{RD} \leq P_{\max}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (10)$$

式中 R_{DB} 为第二时隙 D2DR 到 BS 端的传输速率, R_{DD} 为第二时隙 D2DR 到 DU 端的传输速率. P_{\min} 和 P_{\max} 分别是 D2DR 的最小和最大的发射功率. 根据香农公式, 得到 R_{DB} 和 R_{DD} 的表达式:

$$R_{DB} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^B), \quad (11)$$

$$R_{DD1} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^{D1}), \quad (12)$$

$$R_{DD2} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^{D2}), \quad (13)$$

式中 R_{DD1} 是第二时隙 D2DR 发送给 DU 的来自 BS 的下行信号 S_1 的传输速率, R_{DD2} 是第二时隙 D2DR 发送给 DU 的常规 D2D 通信信号 S_4 的传输速率. 相应的, χ_{SINR}^B 是第二个时隙 BS 端的接收信干噪比. χ_{SINR}^{D1} 和 χ_{SINR}^{D2} 分别是第二时隙 DU 端对于信号 S_1 和 S_4 的接收信干噪比. 从第二个时隙, BS 端和 DU 端的接收信号 \mathbf{y}_B 和 \mathbf{y}_D 可以求出基站和 DU 端的接收信干噪比分别为:

$$\chi_{\text{SINR}}^B = \frac{\sqrt{\alpha} \cdot \mathbf{GHH}^T \mathbf{G}^T}{\sigma_B^2} = \frac{\sqrt{\alpha} \cdot \mathbf{Z} \otimes \mathbf{Q}}{\sigma_B^2}, \quad (14)$$

$$\chi_{\text{SINR}}^{D1} = \frac{\sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{HGG}^T \mathbf{H}^T}{\mathbf{GGG}^T \mathbf{G}^T + \sigma_D^2} = \frac{\sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{Q} \otimes \mathbf{Z}}{\mathbf{Q} \otimes \mathbf{Q} + \sigma_D^2}, \quad (15)$$

$$\chi_{\text{SINR}}^{D2} = \frac{\mathbf{GGG}^T \mathbf{G}^T}{\sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{HGG}^T \mathbf{H}^T + \sigma_D^2} = \frac{\mathbf{Q} \otimes \mathbf{Q}}{\sqrt{1 - \alpha} \cdot \mathbf{Q} \otimes \mathbf{Z} + \sigma_D^2}, \quad (16)$$

式中 $\mathbf{Z} = \mathbf{HH}^T$, $\mathbf{Q} = \mathbf{GG}^T$, \otimes 表示矩阵的点积. 将(10)式转化为,

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha} \left[\frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^B) + \frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^{D1}) + \frac{1}{2} \log_2(1 + \chi_{\text{SINR}}^{D2}) \right], \\ & \text{ s. t. } P_{\min} \leq \text{Tr}[\alpha \cdot \mathbf{Z} \otimes \mathbf{Q} + \sigma_B^2] \leq P_{\max}, \\ & P_{\min} \leq \text{Tr}[(1 - \alpha) \cdot \mathbf{Q} \otimes \mathbf{Z} + \mathbf{Q} \otimes \mathbf{Q} + \sigma_D^2] \leq P_{\max}, 0 \leq \alpha \leq 1. \end{aligned} \quad (17)$$

优化问题(17)式是凸的, 它可以利用标准化的数学软件工具箱, 如 Convex(CVX)来解决. 根据约束条件, 优化功率分配因子 α , 最大化目标吞吐量函数.

3 实验结果与分析

为了验证本方法的有效性, 进行了数值仿真. 假设信道矩阵 \mathbf{H} 和 \mathbf{G} 为高斯信道, 加入的噪声为加性

高斯白噪声. 为了保证双向中继 D2DR 对功率的要求, P_{RB} 和 P_{RD} 的最大功率 P_{max} 为 10 dB. 为了保证接收端对信号的灵敏度, 最小功率 P_{min} 为 0.1 dB, 使信号不至于被噪声所淹没. 利用 CVX 优化解决优化问题(17). 图 2 给出了采用本功率分配方案、随机功率分配方案以及不采用功率分配方案的双向中继网络吞吐量与环境噪声功率的关系曲线. 由图 2 可知, 随着噪声功率逐渐增大, 双向中继网络的吞吐量随之减小. 同时, 本功率分配方案所得的双向中继网络的吞吐量较其他两种方案的吞吐量性能好. 本功率分配方案相对于不采用功率分配方案, 在吞吐量提升了 12% 左右. 本功率分配方案中, D2DR 分配较多的功率给信道质量较好的信道, 双向中继网络可获得更大的吞吐量. 随机的功率分配方案无法根据信道的差异来分配双向中继端的发射功率, 因此双向中继网络的吞吐量相对较小. 不采用功率分配方案则忽略了信道的差异性, 双向中继网络的吞吐量最小.

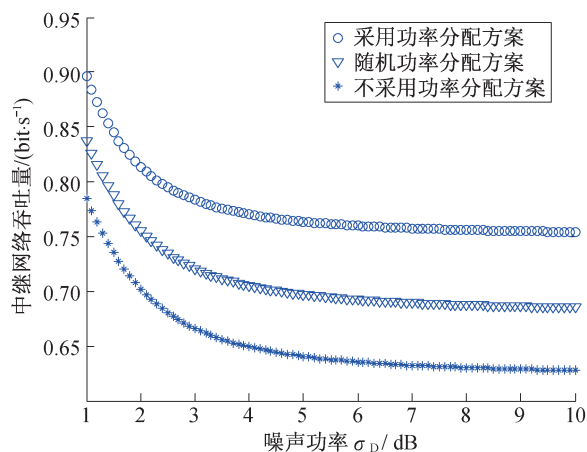


图2 各通信方案中继网络吞吐量的比较

4 结论

研究了蜂窝网络中部署了 D2D 双向中继网络的功率分配方案问题. 首先给出了场景系统模型和信道模型. 优化目标是在满足 D2DR 的发射功率要求后, D2DR 端自动调整功率分配因子, 使双向中继网络吞吐量达到最大. 仿真结果显示, 所采用的功率分配方案能够获得更大的双向中继网络吞吐量. 但是本方案没有考虑信道的复杂性以及其他潜在在通信链路带来的干扰, 还需要进一步改善系统的信道模型.

参考文献:

- [1] 宋苗苗, 罗汉文. 基于容量最优的 D2D RP 方法的研究 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2015, 44(1): 6-10.
Song M M, Luo H W. Resource allocation on Device-to-Device communication with optimal capacity [J]. Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences), 2015, 44(1): 6-10.
- [2] 王珍, 李莉, 王斌, 等. 基于干扰对齐的设备到设备功率控制算法 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2016, 45(2): 166-171.
Wang Z, Li L, Wang B, et al. Device to device power control algorithm based on interference alignment [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2016, 45(2): 166-171.
- [3] Qin Y, Ding M, Zhang M, et al. Relaying robust beamforming for Device-to-Device communication with channel uncertainty [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1859-1862.
- [4] Wang L H, Jin H, Ji X D, et al. Power allocation for cognitive D2D communication assisted by two-way relaying [C]. IEEE International Symposium on Microwave, 2013: 165-170.
- [5] Jayasinghe L K S, Jayasinghe P, Rajatheva N, et al. MIMO physical layer network coding based underlay device-to-device communication [C]. IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 2013: 1390-1408.
- [6] Pei Y Y, Liang Y C. Resource allocation for device-to-device communication overlaying two-way cellular networks [C]. IEEE Wireless Communication and Networking Conference, 2013: 3346-3351.

(责任编辑: 顾浩然, 包震宇)