

基站覆盖下 D2D 两跳传输的功率控制

陈兆羽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: 设备到设备(D2D, device to device)技术是当今无线通信研究的关键技术之一. 在单小区场景下引入了多跳 D2D 通信系统功率控制算法. 在该场景下, 多条 D2D 链路间通过复用频带来通信, 同一 D2D 链路的用户采用两时隙的两跳解码转发中继(DF, Decode and forward)方式传输信息. 不同链路两时隙之间非完全同步下, 使用了同一频带的中继会相互干扰. 作者提出的功率控制算法先引入松弛因子得到功率闭式解, 通过迭代优化该问题中用户的发射功率, 来减少中继间的同频干扰. 最后, 通过数值仿真证明, 在 D2D 系统中加入该功率控制算法后, 可一定程度上提升用户传输速率.

关键词: D2D; 两跳中继; 功率控制

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2015)01-0021-05

0 引言

随着无线通信技术的发展, 作为下一代无线通信系统中的重要组成 Device to Device (D2D) 通信系统, 在 LTE-A^[1] 通信系统中引起了人们的广泛关注, D2D 技术对基站负担增加不大的情况下, 能够有效地提高通信速率. 并且 D2D 通信系统的频谱分配较为灵活, 既可使用小区的频段, 又可以使用公共频段, 如 WiMAX^[2] 频段, 进一步提高了系统的频谱利用率.

在文献[3-7]中, Klaus Doppler、Kaufman 等人从不同角度提出了 D2D 建模方法和解决方案. 文献[3]设计了在 LTE-A 通信系统下, D2D 通信系统会话层的搭建与管理, 在干扰受限的无线局域网下研究新加入的 D2D 通信方式, 对原有通信系统的影响. 在文献[4]中, 研究了小区覆盖下的 D2D 用户多播传输问题, 对信道不佳用户通过合作重传来改善通信质量, 文中引入代价函数, 并设计了相关重传机制的子载波分段式的算法. 文献[5]引入了几何方法分析 D2D 通信系统的性能, 研究了 D2D 通信系统的干扰控制、多跳路由选择及中断等问题, 不足之处在于没有考虑用户间的资源分配. 而文献[6]在放大转发中继构成的系统中, 提出了一种在满足 Time-Sharing 条件下的中继子载波成对、子载波对的分配和载波功率控制的联合算法, 其中资源分配利用的是 Hungarian 算法^[8]. 在文献[7]中, 作者讨论了在有干扰条件下中继选择和资源分配问题, 不足之处在于以往 D2D 通信系统中为用户提供中继的节点的发射功率很有限, 通常其信干噪比较小, 而该文中假设在较大的信干噪比条件下. 综上, D2D 通信普遍集中于相同的链路在理想条件下的资源分配, 而链路间的干扰及链路内部不同的资源分配方式仍然是有待研究的内容.

1 系统模型

研究的场景如图 1 所示, 整个 D2D 链路由三种用户组成, 图 1 中的 S 用户以较低的发射功率发送信

收稿日期: 2014-12-12

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(12ZZ126); 上海师范大学重点学科(DZL126)

通信作者: 罗汉文, 中国上海市东川路 800 号, 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 邮编: 200240, E-mail: hwlw@sjtu.edu.cn.

息,其采用载波监听的方式使用小区内用户未使用的频率传输信息;图 1 中的 R 用户在中心基站调度下传输信息给 D 用户. 由于频谱资源的稀缺,在不重新分配频带资源下,D2D 用户通过频带复用进行通信.

系统总的 D2D 链路数为 m , R 用户可使用的频带数也为 m , D 用户由于采用载波监听方式而无法使用同一 D2D 链路的 R 用户的频带传输信息. 如图 1 所示, S_i 表示第 i 条链路的发射源用户, R_i 表示第 i 条链路中作为两跳中间节点的用户, D_i 表示接收用户. $h_{i,j}$ 表示 S_i 到 R_j 的信道系数, $hr_{i,j}$ 表示 R_i 用户与 R_j 用户间的信道系数, 用 g_i 表示 R_i 到 D_i 信道系数增益系数, B 表示正交子载波的带宽.

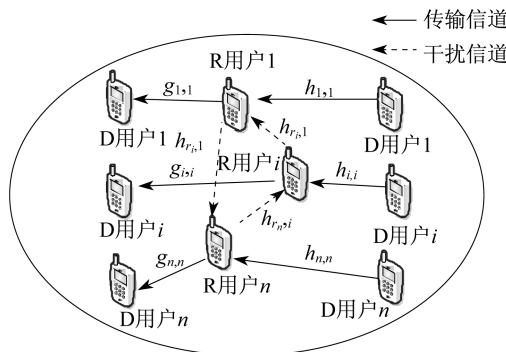


图 1 D2D 两跳场景示意图

D2D 簇间通过两跳传输信息时,当中继用户 R 间完全同步,即所有 R 用户同步接收 S 用户发射的信息并且在下一个时隙同时向 D 用户转发信息时, S 用户与 R 用户不会产生同频干扰. 而在 3GPP 标准化提案^[1]中,产业界普遍提出 D2D 用户不完全同步的方案,以此来减小信令开销, D2D 用户间只是粗略的帧同步,而非上下行同步. 鉴于此,两跳模型中 R 用户间在不能够完全同步时产生的同频干扰问题,就是研究的重点.

1.1 D2D 第一跳过程

D2D 通信采用较低功率传输, D2D 传输距离都较近且通信覆盖范围小. 为了解决这一问题,引入通信系统中常用的中继技术,以扩大 D2D 传输范围. 常见的中继技术包括放大转发 (AF, Amplify and Forward) 方式和解码转发 (DF, Decode and forward) 方式. D2D 链路由小区外向小区内发送消息, 中继 R_i 以时分模式工作采用解码转发, R_i 间频率正交, 由于频谱资源有限, 用户 S_i 复用用户 R_i 频率, 在中继用户 R 间不同步时存在中继间干扰. 如图 2 中, 用户 S_i 通过监听频谱选择发送对象, 发送消息给 R_i , R_i 通过竞争频谱资源并反馈给 S_i 其可用的频率, 最后用户 R_i 转发消息给小区内用户 D_i .

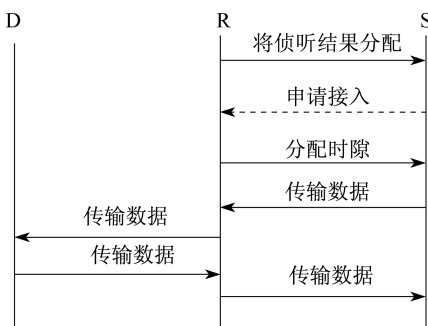


图 2 中继通信流程图

在式(1)中,总干扰 I_{sum} 作为中继间载波成对的依据, P_{max} 为中继的最大发射功率, $hr_{i,j}$ 为中继 j 与干扰中继 i 间的信道系数. 利用 Hungarian 算法^[8]可以得到最小和干扰的载波成对分配.

$$I_{sum} = \sum_{j=1}^m P_{max} hr_{i,j} \tag{1}$$

1.2 D2D 第二跳过程

D2D 第一跳过程中 S 复用了 D2D 第二跳过程 R 对 D 的频谱资源, R 用户会对 S 用户产生干扰, 由于采用编码转发方式, 两跳间总的信干噪比 SINR 为两跳 SINR 的最小值. 在完全同步和完全碰撞的情形下, D 用户接收 S 用户信息的速率分别表示为式(2)和式(3):

$$R_i = \frac{1}{2} B \log \left(1 + \left\{ \frac{P_0 h_{i,i}}{\sigma^2}, \frac{P_i g_i}{\sigma^2} \right\} \right), \tag{2}$$

$$R_i = \frac{1}{2} B \log \left(1 + \min \left\{ \frac{P_0 h_{i,i}}{\sum_{j=1}^m s_{i,j} P_j h_{i,j} + \sigma^2}, \frac{P_i g_i}{\sigma^2} \right\} \right), s_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个用户被 } j \text{ 干扰} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 个用户未被 } j \text{ 干扰} \end{cases} \tag{3}$$

如图 1 中所示, $h_{i,i}$ 为直连信道系数, $hr_{i,j}$ 为干扰信道系数. 式(2)和式(3)中, P_j 为中继 j 的发射功率, σ^2 为噪声功率, $s_{i,j}$ 表示用户 i 占用信道 j 的状态, 其元素非零即一. 由于 DF 中继传输分为两时隙, 速

率为全速率的一半, B 为信道带宽.

2 模型优化

利用文献[6]中的 Time-Sharing 条件, 来分别优化载波分配和功率. 当 D2D 链路满足该条件时, 以局部解来近似全局最优解.

当两时隙完全同步时, R 用户与 S 直接不会相互干扰. 相应的资源分配问题可以利用图论方法建模, 当优化目标为和速率时, 两跳 D2D 通信问题建模为赋权二分图匹配问题. 利用经典的匹配问题的 Hungarian 算法^[8]处理该问题.

当两时隙不同步时, 不同 D2D 链路的 R 用户与 D 用户间会产生同频干扰. 若所有的 R 用户与 D 用户都存在同频干扰时, 称 D2D 系统完全碰撞. 本研究涉及完全碰撞条件下的功率控制. 方便起见, 依照干扰次序将链路重新排列, 使得链路 $i-1$ 用户的干扰对象为链路 i 的用户, 则需要优化的问题转化为:

$$\begin{aligned} \max_{P_i, i=1 \dots m, P_0=P_m} & \left\{ \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \log \left(1 + \min \left(\frac{P_0 h_{i,i}}{P_{i-1} h_{i-1} + \sigma^2}, \frac{P_i g_i}{\sigma^2} \right) \right) \right\}, \\ \text{s. t.} & \quad 0 \leq P_i \leq P_{\max}. \end{aligned} \quad (4)$$

该问题是一个经典非凸的问题, 无法获得问题的全局最优解.

观察到(4)中目标函数形式, 其优化变量位于分母上, 而该类型的目标函数在 DF 中继的两跳通信中较为常见, 相关问题在文献[7]中也中有所涉及. 引入松弛因子 ε 来逼近式(4)中的问题.

略去噪声项, 令 $a_i = \frac{g_i}{\sigma^2}$, $b_i = \frac{P_0 h_{i+1,i+1}}{h_{ri}}$, 则问题(4)近似等价于问题(5),

$$\begin{aligned} \max & \quad \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \log(1 + a_i p_i), \\ \text{s. t.} & \quad \begin{cases} \frac{b_{i-1}}{p_{i-1}} = a_i p_i \varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq 1, i \neq k \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

将等式约束代入目标函数中, 导数为 0 时可得到问题(5)的最优解(6),

$$P_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^m \left((-1)^{i-k} \exp(p_k) \frac{b_{i-1}}{a_i} \exp \left(\sum_{k=1}^{k-i} (-1)^{k-1} \log \left(\frac{b_{k+i-2}}{a_{k+i-1} \varepsilon} \right) \right) \right) & i < k \\ \sum_{i=1}^m \left((-1)^{i-k} \exp(p_k) \frac{b_{i-1}}{a_i} \exp \left(\sum_{k=1}^{k-1} (-1)^{k-1} \log \left(\frac{b_{k+i-2}}{a_{k+i-1} \varepsilon} \right) + \sum_{k=i}^m (-1)^{k-1} \log \left(\frac{b_{k+i-2}}{a_{k+i-1} \varepsilon} \right) \right) \right) & i > k \\ p_k & i = k \end{cases} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, P_0 = P_m, b_0 = b_m.$$

根据问题(5)的中继用户的优化功率式(6), 得到表 1 的算法, 其中 ε 和 p_k 可以利用二分法得到.

3 仿真结果

仿真场景的小区半径为 1400 m, 小区用户数为 1000, D2D 通信区域最大半径为 220 m, 最大 D2D 用户对数为 16, 噪声功率为 -100 dBm, 信道模型为平衰落, 路径损耗系数为 3.5 的瑞利信道, 带宽 B 为 750 kHz.

表 1 资源分配功率控制算法

步骤	资源分配功率控制算法操作内容
1	初始化变量, 利用 Hungarian 算法计算中继干扰和的最小值, 得到中继收发信息的载波对.
2	利用中继载波分配信息构建速率矩阵, 再次利用 Hungarian 算法得到最优的 m 个中继用户的信息发送对象及其信道系数矩阵 $h_{i,i}$, 并计算信道分配矩阵 R_2 .
3	根据资源分配状况根据式(6)利用二分法, 计算最优发射功率 P .
4	重复步骤 2, 3 直到收敛.

图 3 比较了完全同步和完全碰撞下, D2D 系统的和速率与用户间距离的关系. 可以看到随着用户间距离增大或减小, 完全同步和完全碰撞下 D2D 系统的和速率均较小, 而当用户间距离大于 200 m 时, 加入功控算法的完全碰撞系统的和速率与完全同步下系统的和速率相差不大, 表明功率控制在用户距离较近时发挥较好作用. 而图 4 比较了在完全碰撞条件下采用不同最大功率的系统的和速率, 图 4 中算法 1 相比无功控中继用户, 随着功率的增加, 和速率先增后减, 这是因为在最大发射功率较小时用户间的同频干扰不大, 用户以最大功率发送信息达到的速率比功率控制算法好, 但随着最大发射功率的增大, 采用了算法 1 后系统性能有近 10% 的提升.

在图 5 中随着中继数的增加, 系统和速率都随之增加, 而引入了功率控制算法后, 与完全无干扰下的系统相比, 非同步条件下的系统性能增加近 50%. 图 5 中可以看出在无法彻底消除干扰下, 采用功率控制算法可使系统和速率有效提升. 在反映用户速率分布的图 6 中, 可以看出与无功功率控制相比, 通过功率控制使得近 90% 的用户的通信速率提高近 40%, 仅有 5% 的用户的通信速率未得到改善. 在采用了功控算法后, 系统 70% 用户接近无干扰的通信速率.

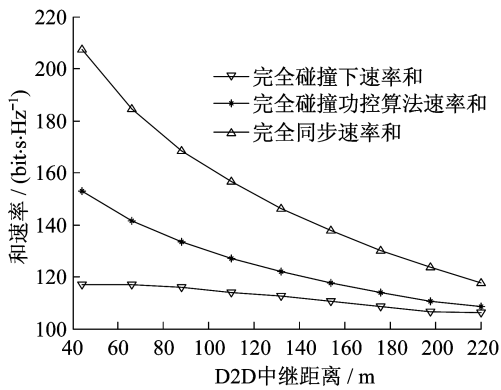


图 3 无干扰和完全干扰下 D2D 用户距离与速率和关系图

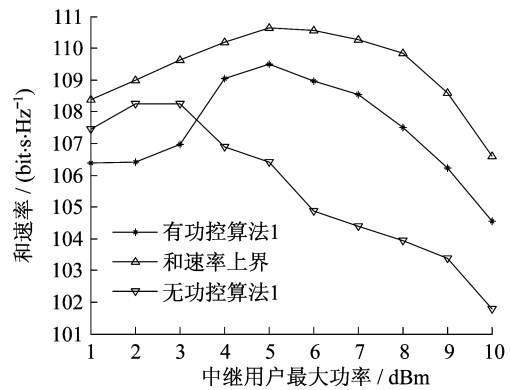


图 4 完全干扰下 16 用户 D2D 系统, 不同功率上限 D2D 用户对和速率关系图

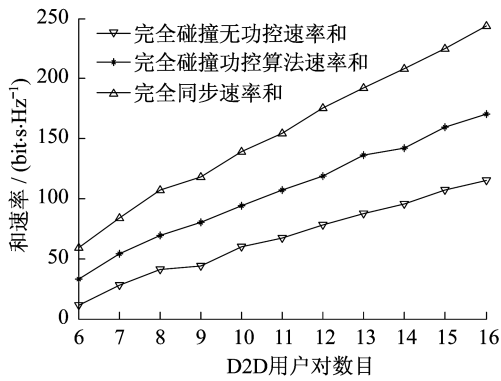


图 5 完全同步和完全干扰下中继数和速率关系图

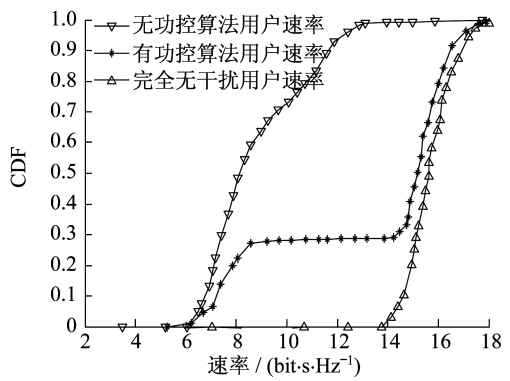


图 6 用户和速率分布图

4 结 论

通过建模基站覆盖下的两跳 D2D 通信, 研究了通过载波监听通信的用户及基站调度频率资源的用户, 这两类 D2D 用户的资源分配及功率控制问题. 讨论了非完全同步下的 D2D 系统的性能, 通过引入松弛因子, 获得发射功率的闭式形式解, 通过迭代来逼近最优发射功率. 该算法通过减少 D2D 链路间的同频干扰, 来改善非完全同步下系统的性能. 与现有 D2D 多跳系统功率控制算法相比, 非同步的 D2D

系统更加符合实际应用场景,但实际中干扰的随机性未讨论,而随机的用户分布和随机的干扰分布是之后的重要研究方向.

参考文献:

- [1] 3GPP. TR 36. 843. Feasibility Study on LTE Device to Device Proximity Services-Radio Aspects, V12. 0. 1 [S]. Valbonne: 3GPP, 2014.
- [2] 3GPP TS 36. 213 v 10. 5. 0. Third Generation Partnership Project (3GPP) Physical layer procedures (Release 10) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) [S]. Valbonne: 3GPP, 2012.
- [3] KLAUS D, MIKA R, CARL W, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42 - 49.
- [4] ZHOU B, HU H L, HUANG S Q, et al. Intra-cluster Device-to-Device relay algorithm with optimal resource utilization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2315 - 2326.
- [5] KAUFMAN B, JORMA L, BEHNAAM A. Spectrum sharing scheme between cellular users and Ad-hoc Device-to-Device users [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1038 - 1049.
- [6] DANG W B, TAO M X, MU H, et al. Subcarrier-pair based resource allocation for cooperative multi-relay OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 9(5): 1640 - 1649.
- [7] CAO J L, ZHANG T K, ZENG Z M, et al. Interference-aware relay selection scheme in cooperative relay networks: International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) [C]. Atlantic City: IEEE, 2013.
- [8] KUHN H W. The Hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2: 83 - 97.

Distribute algorithm for two-hops Device-to-Device communications underlying cellular networks

CHEN Zhaoyu¹, LUO Hanwen^{1,2}

(1. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;
2. Electronic and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper proposed a power control algorithm for multi-hops device to device communication system under the single cellular networks. Different D2D links communicate by the shared band and users in one D2D links transmit message in two-hop Decode-and-forward mode. D2D users among different links which share the same band in asynchronous mode would get mutual interference. We use a proposal algorithm to approximate the optimistic solution with relaxation factor method, firstly get the closed expression of optimistic power, then we modify the transmission power to decrease the co-channel interference. At last, the simulation results verify the correctness of proposed power control algorithm and the improvement of system sum rate.

Key words: D2D; two-hop Decode-and-forward; power control

(责任编辑:包震宇)