

D2D 协作通信网络中基于社交信息的中继选择和功率分配

徐少毅* 张鹏

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

摘要: D2D 通信技术结合社交网络的应用是通信行业发展的热点之一, 而协作通信能够满足高数据速率、广覆盖范围的通信需求。为了促进用户间协作通信的有效性和信任度, 针对 D2D 协作通信网络, 该文首先提出一种综合社交因素和物理因素的协作 D2D 中继模型。进而基于中断概率提出一种中继选择方案, 降低 D2D 通信的中断概率, 提高系统吞吐量; 同时通过最优化理论对源设备和中继设备进行最优功率分配。仿真表明在相同条件下, 该算法具有明显优于传统中继选择算法的性能, 经过最优功率分配能够进一步降低通信系统的中断概率。

关键词: 协作通信; D2D 通信; 社交网络; 中继选择; 中断概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1142-08

DOI: 10.11999/JEIT160746

Social Network Information Based Relay Selection and Power Allocation in D2D Communication Systems

XU Shaoyi ZHANG Peng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The combination of Device-to-Device (D2D) and social networks is one of the hot topics in the current and future communication industry. Cooperative communication is with characteristics of the high data rate and wide coverage range. In order to promote the confidence and the effectiveness between users, for such a cooperative D2D communication network, a comprehensive cooperative D2D relay model is firstly put forward which combines social factors and physical factors. Then, based on the optimization of the outage probability, a relay selection scheme is proposed to reduce the outage probability and improve the system throughput of D2D communication. Furthermore, optimal power allocation of the source and relay equipment is designed. Simulation results show that under the same conditions, the proposed algorithm is superior to other relay selection algorithms with respect to the interruption performance. Moreover, through optimal power allocation, the proposed algorithm can further reduce the outage probability in the D2D cooperative communication system.

Key words: Cooperative communication; Device-to-Device (D2D) communications; Social network; Relay selection; Outage probability

1 引言

随着移动通信技术的飞速发展, 无线频谱资源变得空前紧张, 如何提高频谱利用率和数据传输速率成为未来无线通信中亟待解决的问题。D2D通信是一种能够同时提高系统的频谱效率和通信容量的

技术, 目前得到了广泛的研究和应用。由于无线通信环境的复杂性以及D2D通信复用蜂窝用户资源带来的干扰, 通过协作通信能够改善通信质量, 提高数据传输速率。但是传统方案并未充分考虑通信用户的意愿以及用户间的社交关系, 鉴于此, 结合社交网络的D2D协作通信技术应运而生。该技术能够弥补传统D2D协作通信的缺陷, 很快成为目前国内外最新的研究热点。

Laneman等人^[1]在无线协作通信上进行了开创性的研究, 分析了协作通信系统模型, 提出了不同的协作分集协议并比较了不同协议的中断性能。随后, Argyriou等人^[2]根据信道状态信息并结合网络编码技术^[3], 得到改善系统信噪比和最小化系统干扰的中继选择方案。在D2D通信系统中, 由于在小区边

收稿日期: 2016-07-14; 改回日期: 2017-01-03; 网络出版: 2017-02-28

*通信作者: 徐少毅 shyxu@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61571038), 国家科技重大专项(2016ZX03001011-004), 中央高校基本科研业务费专项(2016JBZ003)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571038), The Important National Science & Technology Specific Projects of China (2016ZX03001011-004), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2016JBZ003)

缘或者覆盖盲区场景下设备间信道质量较差,需要中继的协助^[4-8],从而解决了频率复用产生干扰情况下的覆盖问题,根据兴趣得到的信道增益的不同场景状况问题以及最小消耗功率问题。其中,考虑到中继消耗能量,文献[7]提出了一种具有能量采集功能的终端设备作为中继,并提出了以最小化中断概率为目标的最优中继选择。文献[8]从最大化能量效率的角度出发,提出了多跳D2D网络中的中继选择准则。然而,终端设备是由人来携带和使用的,这样就构成了移动社交网络。社交网络中的一系列参数包括社交关系、中心性、社区等能够反映出蜂窝网用户间的关系,利用社交网络中人们的行为能够协助解决在D2D通信中的中继选择问题。无线通信在中继选择时,利用社交网络的特性能够提高路由效率或者总吞吐量。为了更有效地提高D2D系统的通信质量,改善中继性能,部分学者提出了利用社交网络的特性完善通信系统。文献[9]提出了社交信任协作D2D中继结构,考虑了用户间的物理距离和社交关系,基于有限范围的最优停止理论,提出了一种最优社交感知中继选择策略,从而实现了性能增益和探知成本的平衡。文献[10]在D2D通信中每个节点根据社交关系的自由选择而得出最优的路径,根据节点间的社交关系得出用户的通信概率,并且通过拉格朗日松弛算法得到效用函数的最优值。但是没有考虑用户间的物理因素对于通信概率的影响,而且节点间需要交换社交信息,增加了信息量,恶化了系统信令负担。文献[11]探讨了在通信网络中路由算法的稳健性,通过整合社交网络和通信网络,提出了新颖的路由机制,在保证通信时延、质量和稳健性的前提下,利用社交网络的参数有效提高了路由效率。但是节点间需要交换大量社交信息,增加了信息量和系统信令开销。

综上所述,本文基于D2D通信场景下社交关系和物理链路,首先构建一个综合了社交网中的社交因素和通信网中的物理因素的双层通信模型,并且根据在线社交网络的内容分布,利用了体现用户间通信内容匹配程度的先验概率;然后考虑到中继用户与源用户的社交关系,得出关系强度与中继设备发送功率之间的正比关系;最后联合以上两步,提出了一个最优化中断概率的中继选择方案。通过仿真发现,本文提出的中继选择方案能够有效降低D2D通信的中断概率,提高系统吞吐量,并且进一步证明了该方案更适用于密集蜂窝网络场景,能够应用于未来的复杂密集通信系统。

2 系统模型与问题分析

2.1 系统模型

移动社交网络的出现,颠覆了现有的网络架构,在原有物理层架构的基础上增加了以社交关系为依据的社交层网络架构。D2D通信系统中继选择模型如图1所示,本文考虑的场景为蜂窝网中单个小区内在D2D通信模式下的数据传输,通信模型由社交层和物理层两层结构组成,通信层内存在多个D2D终端以及它们共享频谱资源的蜂窝用户,其中D2D终端复用蜂窝系统的上行资源。尽管D2D终端间的距离较近,但是由于环境及信道条件,部分D2D终端需要中继才能满足通信服务。假设网络中存在多个空闲蜂窝设备,可以作为D2D终端的候选中继。假设所有设备均工作在半双工模式,并且一对D2D终端及其中继设备复用同一个蜂窝设备的资源,进而降低基站的负担。本文用CUE和DUE分别代表蜂窝用户和D2D用户。

社交层内的用户与通信层的设备是一一对应的关系,用户间的路径存在与否与物理层的物理链路没有关系,而是由用户间的社交关系决定。用户间的社交关系由多个因素决定,包括用户间的亲属朋友关系、相遇历史、地理位置均能够影响社交关系的强弱。社交网络中不仅存在着用户的社交关系特性,还包含了用户的浏览记录、个人喜好、社交特性等各种内容。

通信层内用户间构成了一个无方向网络图 $G_c = (N, \epsilon_c)$, N 表示通信层内的设备集合,如果两个通信设备能够正常通信,则认为它们之间存在一个物理链路 $(i, j) \in \epsilon_c$,可达到的物理层归一化通信速率为

$$R_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{P_d^T g_{ij} |h_{ij}|^2}{N_0 + P_c^T g_{cj} |h_{cj}|^2} \right) \quad (1)$$

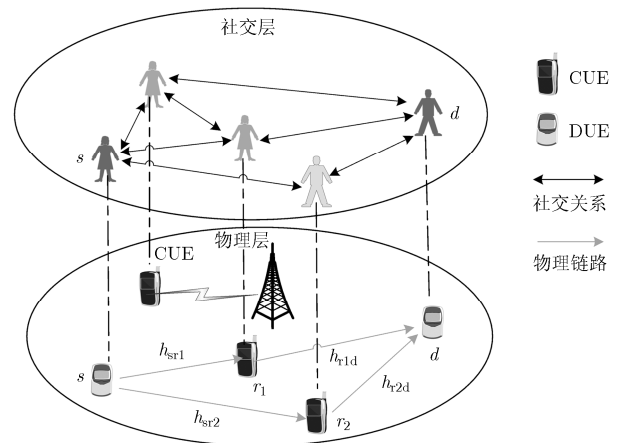


图1 系统模型

其中, P_d^T 和 P_c^T 分别表示 DUE 和 CUE 的发射功率, g_{ij} 是传输路径损耗, 且 $g_{ij} = c(d_{ij})^{-\alpha}$, 其中 c 和 α 分别为路径损耗常数和路径损耗因子, d_{ij} 表示收发设备 i 和 j 之间的距离, N_0 为高斯白噪声的功率。为方便描述, 本文中的功率均是包含了路径损耗的功率, 即: $P_d = P_d^T g_{ij}$ 以及 $P_c = P_c^T g_{cj}$, 则式(1)改写为

$$R_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{P_d |h_{ij}|^2}{N_0 + P_c |h_{cj}|^2} \right) \quad (2)$$

对于D2D通信, 假设 h_{sd} , h_{sc} 及 h_{cd} 分别表示D2D设备之间, D2D发射端与CUE设备之间以及CUE与D2D接收端之间的信道增益。假设该D2D设备需要中继协助, 那么存在 h_{sr} , h_{rd} 表示该D2D通信下源用户到中继设备, 中继设备到目的用户的信道增益, h_{cr} , h_{rc} 表示CUE到中继设备, 中继设备到CUE的信道增益。考虑信道增益服从独立的瑞利分布, 则其功率服从独立指数分布。

另一方面, 在社交层假设设备的拥有者同样构建了社交网络图 $G_s = (N, \varepsilon_s)$, 社交网络图为一个权重网络, 链路 $(i, j) \in \varepsilon_s$ 代表用户 i 和用户 j 之间存在的某种社交关系, 其链路强度由该社交关系的属性决定。

2.2 结合社交网络的问题分析

如果某两个 D2D 设备由于信道质量很差发生通信中断, 需要中继才能够正常通信, 本文采用解调转发方式进行中继通信。根据文献[12]基站能够通过用户的浏览记录利用印度自助餐模型统计该信息的先验信息, 印度自助餐模型通过模拟实际情况下的数据内容在各个终端的浏览历史, 从而得到传输内容服从伯努利分布。当源用户通过中继传送数据给目的用户时, 有一部分数据可以由中继用户直接传输, 那么可以用参数 α_{rd} 表示基站统计出潜在在中继用户中存储的内容占发送数据的比例, 且该参数将随着时间进行更新。假设目标用户的需求数据量为 Q , 那么所用时间可以按以下方法计算得到。

首先, 由于源用户到中继用户的信道状态没有变化, 因此其速率为 $R_{sr} = \log_2 \left(1 + \frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_0 + P_c |h_{cr}|^2} \right)$,

所以在传输 $(1 - \alpha_{rd})Q$ 的数据量时所用时间为 $t_{sr} = \frac{(1 - \alpha_{rd})Q}{R_{sr}}$ 。而中继用户到目的用户传输所有数据所需时间为 $t_{rd} = Q/R_{rd}$, 所以可以获得总的时延减少增益为 $\Delta t = \alpha_{rd}Q/R_{sr}$ 。

在本文考虑的模型中, 由于中继用户是否愿意消耗自己的功率来传送数据是由两者之间的信任度决定的, 假设基站设定的中继初始功率为 P_r , 如果

中继用户与源用户存在较强的社交关系 λ_{sr} , 且 $\lambda_{sr} \in [0, 1]$, 那么中继用户愿意贡献较大比例的传送功率协助中继节点传送数据, 可以记为 $\lambda_{sr}P_r$ 。因此, 假设存在一个用户 s , 其通过中继用户 r 传送数据到目的用户 d , 中继用户的发送功率与源用户和中继用户的社交信任度成正比, 那么中继节点到目的节点的信噪比可表示为

$$\gamma_{rd} = \frac{\lambda_{sr}P_r |h_{rd}|^2}{N_0 + P_c |h_{cd}|^2} \quad (3)$$

D2D 发射端到中继设备, 中继设备到 D2D 接收端的中断概率等于其接收信号的 SINR 的累积分布函数, 即

$$P_{out}^{sr} = P_r(\gamma_{sr} < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{rc}(\gamma_{sr})d\gamma_{sr} = F_{rc}(\gamma_{th}) \quad (4)$$

$$P_{out}^{rd} = P_r(\gamma_{rd} < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{rc}(\gamma_{rd})d\gamma_{rd} = F_{rc}(\gamma_{th}) \quad (5)$$

式中, γ_{th} 为 D2D 发送端到中继及中继到 D2D 接收端的 SINR 阈值, $f_{rc}(\gamma_{sr})$ 为概率密度函数, 通过文献[13]中引理 1, γ_{sr} 和 γ_{rd} 的 CDF 可以获得, 并且可得到从源节点到中继节点以及从中继节点到目的节点的中断概率 P_{out}^{s-r} 和 P_{out}^{r-d}

$$P_{out}^{s-r} = P_r \left[\frac{P_s |h_{sr}|^2}{P_c |h_{cs}|^2 + N_0} < \gamma_{th} \right] = 1 - \frac{P_s}{P_s + P_c \gamma_{th}} \exp \left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_s} \right) \quad (6)$$

$$P_{out}^{r-d} = P_r \left[\frac{\lambda_{sr} P_r |h_{rd}|^2}{P_c |h_{cd}|^2 + N_0} < \gamma_{th} \right] = 1 - \frac{\lambda_{sr} P_r}{\lambda_{sr} P_r + \gamma_{th} P_c} \exp \left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{\lambda_{sr} P_r} \right) \quad (7)$$

所以 D2D 通信的中断概率为

$$P_{out} = P_r \left[\frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_0 + P_c |h_{cr}|^2} < \gamma_{th} \right] + P_r \left[\frac{P_s |h_{sr}|^2}{N_0 + P_c |h_{cr}|^2} > \gamma_{th} \right] \cdot P_r \left[\frac{\lambda_{sr} P_r |h_{rd}|^2}{N_0 + P_c |h_{cd}|^2} < \gamma_{th} \right] \quad (8)$$

由于 γ_{th} 一般较小, N_0 为噪声功率, 假设选择的中继与源用户的社交关系数量级数并非极小, 可以从文献[4]中的 D2D 直接链路受限条件得到 $\gamma_{th} N_0 \ll P_s$ 并且 $\gamma_{th} N_0 \ll \lambda_{sr} P_r$, 则

$$\frac{\gamma_{th} N_0}{P_s} \rightarrow 0, \quad \frac{\gamma_{th} N_0}{\lambda_{sr} P_r} \rightarrow 0 \quad (9)$$

那么选择中继 r 时 D2D 通信的中断概率可以简化为

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= 1 - \frac{P_s}{P_s + \gamma_{\text{th}} P_c} \cdot \frac{\lambda_{\text{sr}} P_r}{\lambda_{\text{sr}} P_r + \gamma_{\text{th}} P_c} \\
&= 1 - \frac{1}{1 + \gamma_{\text{th}} \frac{P_c}{P_s}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma_{\text{th}} P_c}{\lambda_{\text{sr}} P_r}} \quad (10)
\end{aligned}$$

考虑选择的中继用户 j 能够使 D2D 通信的中断概率最小以保证系统的通信质量和性能, 设定影响因子

$$\beta_j = \left(1 + \frac{\gamma_{\text{th}} P_c}{P_s} \right) \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{\text{th}} P_c}{\lambda_{\text{sr}} P_r} \right) \quad (11)$$

3 基于社交信息的中继选择算法

传统的中继选择算法的基本思想是: 首先对所有可能的 M 个中继节点计算其信道增益或者信噪比, 然后通过全局搜索方法找出吞吐量最大或者中断概率最小的中继, 作为最优中继。但是传统的算法没有考虑社交因素, 导致计算复杂度较大。本文提出基于社交信息的中继选择算法, 改善了系统的吞吐量, 降低了 D2D 用户间中断概率、时延等参数, 同时显著降低了计算复杂度。

3.1 中继候选集

在中继选择过程中, 为了降低计算复杂度, 一般需要首先确定一个较小范围的中继候选集, 然后从该候选集中选择一个使通信性能最优的中继。对候选集的要求是范围既不能太大, 也不能太小。如果候选集太大, 不能达到降低复杂度的要求, 如果候选集太小, 可能使得最优中继遗落在候选集外。

中继候选集选择方法一般是通过设置影响参数的阈值来确定候选集, 比如设置信道增益或者 D2D 距离的阈值来选择中继是否加入候选集。结合前文中表示潜在中继用户传输内容比例的参数 α_{rd} 可以协助建立一个候选集。

首先通过设置信道增益阈值获得初始候选集, h_i 为两跳物理路径信道增益的最小值, 即 $h_i = \min(h_{\text{sr}}, h_{\text{rd}})$, 那么根据文献[5]可知, 考虑到低复杂度和高性能, 可以设置阈值为

$$h_{\text{thr}} = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\gamma C}} \right) C \quad (12)$$

其中, $C = h_{\text{sd}}(1 + h_{\text{sd}}\gamma)$, γ 为接收端的 SNR。这样通过 $h_i \geq h_{\text{thr}}$ 能够得到一组满足信道阈值状态的初始候选集 H 。

根据上节中表示潜在中继用户传输内容比例的参数 α_{rd} 可知, 较大的参数 α_{rd} 能够有效地提高系统时延性能, 所以给这个参数设置一个阈值, 既降低了计算复杂度, 也提高了通信性能。令 $\alpha_{\text{rd}} \geq \alpha_{\text{thr}}$, 即 α_{thr} 为所选阈值, 为一个常数。这样, 根据 α_{thr} 也

可以得到一个候选集 S , 所以为了得到一个既能提高通信可靠性又能改善时延特性的候选集为 $Q = H \cap S$ 。

3.2 OSA(Optimal Social Algorithm)中继选择方案

基于社交网络的相关参数, 本文提出的中继选择方案 OSA 可以总结为表 1 的算法 1。

表 1 基于社交因素的中继选择算法

算法 1 基于社交因素的中继选择算法

- (1) 目的用户向基站请求标号为 n 的内容时, 基站确定发送数据来源用户;
- (2) 根据先验信息 $\pi(m_k^{n-1})$ [12] 及先验概率 $\alpha_{\text{rd}} \geq \alpha_{\text{thr}}$, 可以确定与该内容相关的候选中继集合 S ;
- (3) 通过源用户发送的 RTS(Ready-To-Send)信息和目的节点发送的 CTS(Clear-To-Send)信息, 获得相应的信道信息, 根据 $h_i \geq h_{\text{thr}}$ 确定候选集 H ;
- (4) 将上两步骤中得到的候选集合合并, 得到一个新的候选集合 $Q = H \cap S$;
- (5) 根据式(11)计算候选集 Q 中的潜在中继节点的影响因子 β_j 并对它们进行排序, 其最小值对应的中继即为选择的中继节点。

综上所述, OSA 算法除了能够降低系统中断概率, 还有以下几个特性:

(1) 时延性能: 利用社交网络中用户的浏览历史及先验概率, 能够显著降低通信时延, 改善系统性能。

(2) 数据速率: 在 D2D 用户间距离不太大时, 本算法的系统吞吐量得到提高, 当距离变大时, 本算法系统吞吐量接近于最优中继选择。

(3) 应用场景: OSA 方案充分利用了社交因素, 更适用于密集蜂窝网络中, 特别适合未来的复杂密集通信场景。

3.3 最优功率分配

在选择最优中继后, 考虑到 D2D 发射端和中继设备的功率分配方案将会影响系统性能^[14,15], 本节的目标是考虑总功率一定的条件下使 D2D 用户的中断概率最小, 对源节点和中继节点进行功率分配, 结合信道条件和社交关系, 通过最优化方案求出使系统中断概率最小的功率分配因子。

根据上节可将问题建模为

$$\begin{aligned}
\min_{P_s, P_r} & \left\{ \left(1 + \gamma_{\text{th}} \frac{P_c}{P_s} \right) \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{\text{th}} P_c}{\lambda_{\text{sr}} P_r} \right) \right\} \quad (13) \\
\text{s.t.} & P_s + P_r \leq P
\end{aligned}$$

式中, P 为 D2D 发射端和中继设备的总功率, 可进一步化简为

$$\min_{P_s, P_r} \left\{ \left(1 + \frac{a}{P}\right) \left(1 + \frac{b}{P}\right) + \left(1 + \frac{a}{P}\right) \frac{b}{P} \frac{P_s}{P_r} + \left(1 + \frac{b}{P}\right) \frac{a}{P} \frac{P_r}{P_s} + \frac{ab}{c^2} \right\} \quad (14)$$

s.t. $P_s + P_r \leq P$

通过求和不等式可以得到

$$(bP + ab) \frac{P_s}{P_r} = (aP + ab) \frac{P_r}{P_s} \quad (15)$$

求得

$$P_s = \left[\frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a(a+P)}{b(b+P)}}} \right] P, \quad P_r = \left[\frac{1}{1 + \sqrt{\frac{b(b+P)}{a(a+P)}}} \right] P \quad (16)$$

式中的参数 a, b 分别为

$$a = \gamma_{\text{th}} P_c, \quad b = \frac{\gamma_{\text{th}} P_c}{\lambda_{\text{sr}}} \quad (17)$$

由此得到基于社交因素的功率分配方法。综合中继选择和功率分配的算法可描述为表 2 的算法 2。

表 2 基于社交因素的中继选择和功率分配算法

算法 2 基于社交因素的中继选择和功率分配算法

- (1) 根据算法 1 得到最优中继。
- (2) 根据式(17)计算参数 a, b 的值。
- (3) 根据式(16)分配源用户和中继用户的功率。

3.4 性能分析

本节将从容量和复杂度两个方面对本文所提算法进行性能分析。

基于本文提出的结合社交网络的 D2D 归一化传输速率为

$$\begin{aligned} R^{s-d} &= \min(R^{s-r}, R^{r-d}) \\ &= \min \left(\log_2 \left(1 + \frac{P_s |h_{\text{sr}}|^2}{P_c |h_{\text{cs}}|^2 + N_0} \right), \right. \\ &\quad \left. \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_{\text{sr}} P_r |h_{\text{rd}}|^2}{P_c |h_{\text{cd}}|^2 + N_0} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

该场景下的容量限可以表达为

$$R_{\text{Lim}}^{\text{Lim}} = \max \left(R_{\text{Lim}}^{s-d}, \min \left(R_{\text{Lim}}^{s-r}, R_{\text{Lim}}^{r-d} \right) \right) \quad (19)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{Lim}}^{s-d} &= \log_2 \left(1 + \max \gamma^{s-d} \right) \\ R_{\text{Lim}}^{s-r} &= \log_2 \left(1 + \max \gamma^{s-r} \right) \\ R_{\text{Lim}}^{r-d} &= \log_2 \left(1 + \max \gamma^{r-d} \right) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, γ^{s-d} , γ^{s-r} 和 γ^{r-d} 分别表示从 D2D 发射端到 D2D 接收端, 从 D2D 发射端到中继节点以及从中

继节点到 D2D 接收端的 SINR。可知 $R^{s-d} \leq R^{\text{Lim}}$ 。

下面将从计算复杂度进行性能分析, 并将本文所提算法与传统中继选择方法进行对比。首先定义用来比对的基于信道状态信息的最优中继选择方案为 OMA(Optimal Manage Algorithm), 其基本思想为对所有可能的 M 个中继节点计算其信噪比, 然后通过全局搜索方法找出吞吐量最大的中继作为最优中继。由于考虑从 D2D 发射端到中继节点, 以及从中继节点到 D2D 接收端这两段路径, 因此 OMA 的计算复杂度为 $O(2M)$ 。而本文提出的 OSA 首先从 M 个候选中继中根据先验信息获取 L 个候选中继($L < M$), 再从 L 个终端设备中找出满足 $h_i = \min(h_{\text{sr}}, h_{\text{rd}})$ 的 N 个中继($N < L$), 再根据式(11)的计算结果选择最优中继。因此, 本文提出的 OSA 的计算复杂度为 $O(N)$ 。由于一般情况下 $N \ll M$, 所以与传统的 OMA 相比, 采用本文提出的 OSA 将使得计算复杂度显著降低。

4 中继选择方案性能仿真

4.1 仿真场景及参数

本节考虑在单小区场景下, 将 D2D 用户和蜂窝用户分布在小区内, D2D 用户与基站的距离至少为半个小区半径。仿真中小区半径设置为 500 m, D2D 发射机与 CUE 的最大发射功率均为 23 dBm。信道带宽为 180 kHz, D2D 用户复用蜂窝用户的频谱资源, 一些空闲蜂窝用户随机分布在小区内, 可作为 D2D 用户的潜在中继。社交关系 λ_{sr} 服从 Pareto 分布^[6]。

其余的仿真参数如表 3 所示。

4.2 算法性能仿真分析

本节通过仿真评估本文所提出的算法性能。将本文所提中继选择方案 OSA 与另外两种中继选择算法做比较: 基于信道状态信息的最优中继选择方案 OMA, 即选择最大信噪比作为最佳中继用户; 以及随机选择方案 RA(Random Algorithm), 即在潜在中继集合中随机选择一个节点作为中继。本节通过 3 个参数来评估算法的性能: (1)中断概率, (2)

表 3 系统参数

参数	数值
D2D-Tx 与 D2D-Rx 之间的距离	50-500 m
空闲蜂窝用户数量	5-50 个
噪声功率密度	-174 dBm/Hz
信道冲击响应	服从瑞利分布
路径损耗因子	4
SINR 阈值	3 dB

D2D 链路时延, (3)系统吞吐量。

图 2 描述 3 种算法的中断概率随 D2D 用户间距离变化的情况。因为 OMA 选择了最优信道状态的设备作为中继, 从而使得中断概率比随机选择方案更小。但本文提出的方案综合考虑了社交关系和信道信息, 所以获得了最小的中断概率。由于 RA 选择中继用户的随机性, D2D 用户间的距离对其影响较小, 其中断概率一直较高, 而随着 D2D 用户间距离的增加, OMA 中断概率迅速变大, 而本文提出的 OSA 随着 D2D 用户间距变化较小, 在 D2D 的最大约束距离为 300 m 时, OSA 与 OMA 相比中断概率降低了 19 dB, 其性能较优。

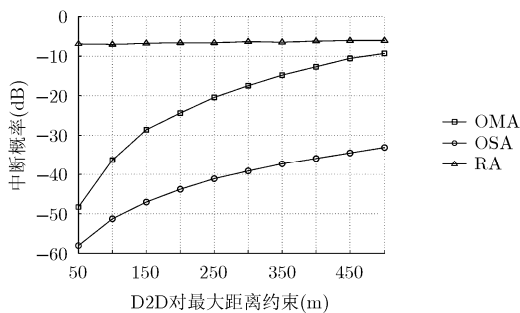


图 2 中断概率随 D2D 通信对距离的变化曲线

图 3 描述传输时延随着 D2D 距离变化时两种算法的比较, 设定的传输数据量为 1 kbit。(由于 RA 性能较差, 与 OSA 和 OMA 不在一个量级内, 所以省去了 RA 算法性能)。由图 3 可看出由于用户间的距离变大, 并且路径损耗也随之变大, 所以时延增加。但是本文提出的 OSA 考虑到中继用户与目的用户的内容先验概率, 其时延效果比 OMA 要好。当先验概率越大时其时延效果越好, 且当 $\alpha_{thr} \geq 0.9$ 时, 由于大部分数据将由中继提供, 所以其时延变化趋于稳定, 当 D2D 用户间距离为 300 m 时与最佳中继选择方案相比能够节省 2.4 μs 。但其大小与空闲蜂窝用户数量以及传输数据的网上浏览记录的分布相关, 所以需要综合影响因素来确定 α_{thr} 的值。

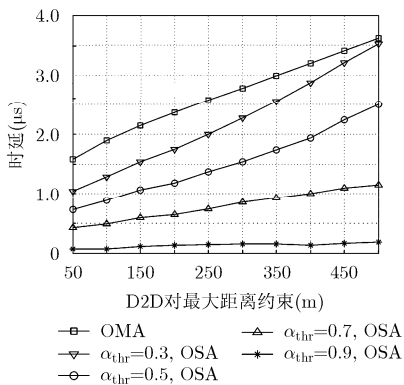


图 3 传输时延随 D2D 通信对距离的变化曲线

图 4 显示了系统吞吐量随着 D2D 距离变化的情况, 并与容量界进行了对比。可以看出, 当用户间的距离变大时, 路径损耗随之变大, 吞吐量将下降。可以看到本文提出的 OSA 接近于最优中继选择方案 OMA。当 D2D 用户间的距离较小时 ($d < 150$ m), OSA 的吞吐量要大于 OMA, 由于 OSA 综合考虑社交关系和信道增益两个因素, 当 D2D 通信对距离约为 200 m 时, OSA 与 OMA 吞吐量相等。但随着距离的逐渐增大, 信道增益将占主要影响因素, OSA 吞吐量要略低于 OMA。而 D2D 用户间的距离对 RA 速率影响较小。

图 5 描绘了中断概率与空闲蜂窝用户数量之间的关系。由图 5 可以看出随空闲蜂窝用户数量的增加, D2D 可选择的中继用户增多, 所以有机会选择更优的中继使得 D2D 通信的中断概率更低。由于空闲蜂窝用户随机分布在小区内, 通过 RA 选出的最优中继的概率并没有增加, 所以其中断概率并没有得到改善。但是对于 OMA 来说, 当空闲蜂窝用户增加到一定程度, 信道状态最优的中继已经选出, 增加更多的空闲用户并不能显著地提高系统的中断概率。对于本文提出的 OSA 来说, 由于系统综合考虑社交关系和信道状态两个因素, 所以空闲蜂窝用户在显著增加时也能够提高中断概率。从图中观察到当空闲蜂窝用户数量为 30 个时, OSA 与 OMA 相比中断概率降低了 10 dB, 由此可得出结论, OSA 更适合在密集蜂窝网络中使用。

图 6 显示了中断概率随源用户与中继用户不同功率分配的变化情况。设定总功率为 40 dBm, 通过本文提出的功率分配算法可知源用户与中继用户的最优功率分配值分别为 17.3 dBm 和 21.6 dBm。其功率分配可由信道增益和社交关系综合决定。与功率分配情况源用户与中继用户的功率比分别为 1:1, 7:3 及 3:7 的情况对比, 可得最优功率分配情况下的中断概率最小, 在 D2D 用户间的距离为 500 m 时, 中断概率分别可降低 15%, 35% 及 53%。所以在最优功率分配情况下, 源用户和选出的最优中继可达到较低的中断概率。

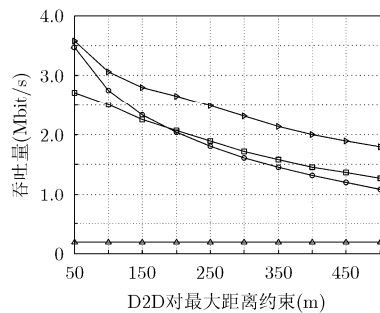


图 4 系统吞吐量随 D2D 通信对距离的变化曲线

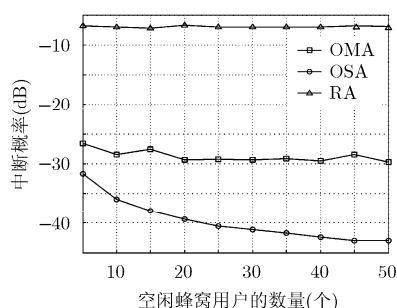


图5 中断概率随空闲蜂窝用户数量的变化曲线

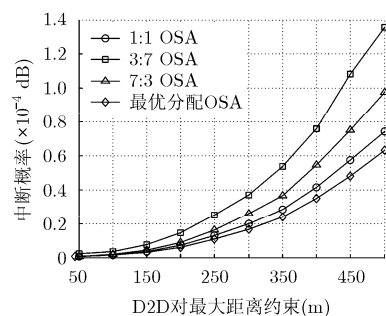


图6 不同功率分配的中断概率曲线

5 结论

本文在 D2D 通信场景下, 综合考虑社交网络的社交因素和通信网中的物理因素, 提出了一个性能良好中继选择方案。首先, 根据用户的需求信息在基站中统计出先验概率, 选择出先验概率较大的作为中继候选集, 可以显著地改善系统的时延。其次, 考虑中继用户与源用户的社交关系, 通过最优化系统的中断概率, 得出综合社交因素和物理因素的影响因子从而选择中继用户。最后根据最优化理论, 求得源用户与中继用户间的最优功率分配方案。

仿真结果表明, 本文提出的中继选择方案能够有效降低 D2D 通信的中断概率, 并改善系统吞吐量。对于 3 种不同方案的对比, OSA 中断性能更好, 与 OMA 和 RA 相比而言, 对 D2D 通信对间距离的敏感度更低; 随着先验概率的增加, OSA 的时延性能更加优良; 当 D2D 通信对距离有限时, 其吞吐量性能优于 OMA 方案; 本文最后还研究证明了 OSA 方案更适用于密集蜂窝网络中, 能够应用于未来的复杂密集通信网络中。

参考文献

- [1] LANEMAN J N, TSE D N C, and WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080. doi: 10.1109/TIT.2004.838089.
- [2] ARGYRIOU A. Forwarding interfering signals in wireless ad hoc networks under MRC receiver processing[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), London, 2015: 6222-6227. doi: 10.1109/ICC.2015.7249315.
- [3] ANSARI R I, HASSAN S A, and CHRYSOSTOMOU C. RANC: Relay-aided network-coded D2D network[C]. Proceedings of the International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICSP), Singapore, 2015: 1-5. doi: 10.1109/ICICSP.2015.7459911.
- [4] WANG Lefei, PENG Tao, YANG Yufeng, *et al.* Interference constrained D2D communication with relay underlying cellular networks[C]. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Las Vegas, 2013: 1-5. doi: 10.1109/VTCFall.2013.6692247.
- [5] XIA Weicheng, SHAO Shixiang, and SUN Jun. Relay selection strategy for Device to Device communication[C]. Proceedings of the IET International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT), Beijing, 2013: 318-323. doi: 10.1049/cp.2013.0065.
- [6] GHAZANFARI A, TOLLI A, and KALEVA J. Joint power loading and mode selection for network-assisted device-to-device communication[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), London, 2015: 2548-2553. doi: 10.1109/ICC.2015.7248708.
- [7] YANG H H, LEE J, and QUEK T Q S. Heterogeneous cellular network with energy harvesting-based D2D communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(2): 1406-1419. doi: 10.1109/TWC.2015.2489651.
- [8] WEI Lili, HU R Q, QIAN Yi, *et al.* Energy efficiency and spectrum efficiency of multihop Device-to-Device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016: 65(1): 367-380. doi: 10.1109/TVT.2015.2389823.
- [9] ZHANG Mengyuan, CHEN Xu, and ZHANG Junshan. Social-aware relay selection for cooperative networking: an optimal stopping approach[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, 2014: 2257-2262. doi: 10.1109/ICC.2014.6883659.
- [10] KOUTSOPOULOS I, NOUTSI E, and IOSIFIDIS G. Dijkstra goes social: Social-graph-assisted routing in next generation wireless networks[C]. Proceedings of the European Wireless Conference, Barcelona, 2014: 1-7.
- [11] BIGRIGG M W, CARLEY K M, MANOUSAKIS K, *et al.* Routing through an integrated communication and social network[C]. Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Boston, 2009: 1-7. doi: 10.1109/MILCOM.2009.5379848.
- [12] ZHANG Yanru, PAN E, SONG Lingyang, *et al.* Social

- network enhanced device-to-device communication underlaying cellular networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications in China-Workshops (CIC/ICCC), Xian, 2013: 182-186. doi: 10.1109/ICCCChinaW.2013.6670590.
- [13] MIN H, SEO W, LEE J, *et al.* Reliability improvement using receive mode selection in the device-to-device uplink period underlaying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(2): 413-418. doi: 10.1109/TWC.2011.122010.100963.
- [14] SU W, SADEK A K, and LIU K J R. Cooperative communication protocols in wireless networks: Performance analysis and optimum power allocation[J]. *Wireless Personal Communications*, 2008, 44(2): 181-217. doi: 10.1007/s11277-011-0313-8.
- [15] 孙立悦, 赵晓晖, 毓明. 基于中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 84-91.
SUN Liyue, ZHAO Xiaojun, and GUO Ming. Outage probability based power allocation and relay selection algorithm in cooperative communication[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(10): 84-91.
- [16] LI Hongxing, WU Chuan, LI Zongpeng, *et al.* Stochastic optimal multirate multicast in socially selfish wireless networks[C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM, Orlando, 2012: 172-180. doi: 10.1109/INFOCOM.2012.6195545.
- 徐少毅: 女, 1975年生, 副教授, 研究方向为无线资源管理、协作通信、超宽带通信。
- 张 鹏: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为社交网络与无线通信。