



研究与开发

一种基于多跳 D2D 和社交感知的新颖中继选择算法

李良, 杨新杰

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 将社交域引入蜂窝网络场景中的多跳设备到设备 (device-to-device, D2D) 通信中, 并提出了一种用于蜂窝网络下多跳 D2D 通信的新颖中继选择算法。不同于以往的中继选择算法, 所提出的算法以反向顺序选择每一跳的中继, 减少了算法执行所产生的信令开销。在算法中引入了社交域信息, 研究了社交域信息在多跳 D2D 通信中的作用。研究表明, 终端用户之间的社交关系对算法性能具有不可忽略的影响, 从而为实际系统的算法实现提供了一定的指导意义。另外, 通过大量的蒙特卡洛仿真得到的结果表明, 所提算法在不考虑社交关系信息时吞吐量和能量效率均优于对比算法, 在考虑社交关系信息时, 尽管其吞吐量会自然降低, 但其能量效率远远优于对比算法。

关键词: 设备到设备; 频分双工; 中继选择; 社交感知

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022235

A multi-hop D2D and social awareness based novel relay selection algorithm

LI Liang, YANG Xinjie

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The social domain was introduced to multi-hop D2D (device-to-device) communication in cellular network scenarios, and a novel relay selection algorithm for multi-hop D2D communication under cellular network was proposed. Unlike existing relay selection algorithms, the proposed algorithm selects relays for each hop in reverse order, which reduces the signaling overhead caused by algorithm implement. Then, social domain information of mobile terminals was introduced to the algorithm and its influence on the algorithm's performance was studied, which was found significant enough not to be overlooked hence providing useful guidance to designing algorithms in practical systems. Moreover, via extensive Monte Carlo simulations, it is discovered that the proposed algorithm outperforms the benchmarks in terms of data throughput and energy efficiency in absence of social relationship information. In a more practical implementation with social relationship information included, the proposed algorithm though naturally achieving less throughput, significantly outperforms the benchmarks in energy efficiency.

Key words: device-to-device, frequency division duplex, relay selection, social awareness

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-07-28

基金项目: 国家重点实验室开放基金项目 (No.SKLNST-2021-1-12); 宁波市自然科学基金项目 (No. 2019A610073)

Foundation Items: The National Key Laboratory Open Foundation Project (No.SKLNST-2021-1-12), The Ningbo City Natural Science Foundation Project (No. 2019A610073)



0 引言

近年来,随着移动通信技术以及互联网行业的迅速发展,智能无线终端得到了快速发展和普及,蜂窝网络用户数量呈现爆炸式增长。根据《思科年度互联网报告(2018—2023年)》,到2023年,全球手机用户将增加到57亿人(占总人口的71%),全球移动设备将增长到131亿部^[1]。如此庞大的用户和设备数量,给蜂窝网络的基站带来了巨大的负载,同时导致无线频谱资源短缺、频谱利用率低下和网络容量不足等问题日益凸显^[2]。研究人员因此提出了设备到设备(device-to-device, D2D)通信技术以应对上述问题。不同于只允许设备和基站之间通过上行/下行链路进行通信的传统移动通信技术, D2D 允许邻近的移动设备直接进行通信,有效地提高了蜂窝网络的频谱效率或吞吐量^[3]。另一方面, D2D 设备既可以通过使用非授权频谱或专用蜂窝频谱实现通信,也可以通过复用蜂窝设备使用的频谱实现通信^[4]。这种复用模式能够大幅提高频谱利用率,有助于解决频谱短缺问题^[5]。由于具有多种优势, D2D 技术被 3GPP 确定为 5G 关键技术之一,受到越来越多研究人员的关注。

传统的直连 D2D 具有通信距离短,消耗设备电量多,对蜂窝网络干扰大等问题。另外,在设备间距离较远时,直连 D2D 的源设备可能无法接入目的设备^[6]。一些研究人员在 D2D 中引入中继技术,进一步提高了 D2D 通信的性能,中继选择由此成为 D2D 中一个重要的研究方向。

为了减少算法执行给基站带来的负担,研究人员提出了一些不需要基站参与的中继选择算法。文献[7]提出了一种基于计时器的中继选择方法,该方法能够分布式确定并选择最好的中继。文献[8]提出了一种用以设备为中

心的中继选择方案。该方案通过交换设备邻居表获得 D2D 通信设备的共同邻近设备,然后基于信干噪比和剩余电量等多种参数从共同邻近设备中选出最佳的设备作为中继,相比传统的以网络/基站为中心的方案,减少了基站负载和网络开销。

另外,为了进一步扩大 D2D 通信范围和提升通信性能,研究人员将研究从单跳延伸到多跳 D2D 通信^[9]。文献[10]提出了一种基于 Dijkstra 算法的 D2D 多跳路由算法,仿真结果表明与单跳直接 D2D 通信相比,多跳路径可以实现更高的吞吐量。文献[11]提出了一种用于 D2D 通信的自适应干扰感知多跳路径选择算法。该算法通过了解用户位置,使多跳路径从 D2D 发射端开始首先到达小区边缘,然后沿小区边缘移动,最后到达接收端附近时返回小区内部。该算法在小幅度牺牲传统蜂窝容量的情况下显著提高了整体网络容量。

考虑在实际的系统中,设备充当中继时具有自身意愿问题,研究人员考虑更加现实的场景并将终端的社交域引入 D2D 研究中。文献[12]提出了一种利用社交网络的中继选择方法。该方法综合考虑中继的物理域和社交域因素,将根据用户遭遇历史计算得到的链路传输稳定性和根据用户亲密度计算得到的合作意愿作为标准选择中继。相比传统的方法,该方法可以提高中继选择成功的概率,减轻蜂窝网络的负担。文献[13]提出了一种创新的社交感知节能中继选择机制,该机制考虑了移动用户之间隐藏的社交关系,能够确保更多用户愿意参与合作通信。

上述 D2D 中继选择算法均应用于蜂窝网络场景,文献[14]提出了一种应用于物联网场景的多跳 D2D 通信最优路由算法,在算法中融合了社交域信息,通过使用基于排序的信任模型推导得到 D2D 连接的信任概率,由信任概率得到了节点间的可信任连接概率,并在算法中考虑了可

信任连接概率的影响。最终所提出的路由算法可以使任意一对 D2D 以分布式的方式实现最高的可信任连接概率,几乎达到了通过穷举搜索实现的性能。

综上所述,目前在两跳 D2D 方面已有一些关于分布式或以设备为中心的中继选择算法的研究,但有关多跳 D2D 中继选择的研究基本没有考虑算法的执行方式和复杂度这一问题。另一方面,现有关于多跳 D2D 中继选择的研究是基于半双工中继,算法的吞吐量性能受到限制。同时,对社交域信息在实际系统中对算法性能的影响的研究还不充分。因此,本文提出了一种用于蜂窝网络下多跳 D2D 通信的中继选择算法。通过使用全双工中继,保证了多跳 D2D 的吞吐量性能。通过合理地设计执行流程,中继选择算法在工程实现上能够以半分布式的方式执行,有效地减少了基站负载。考虑设备充当中继的意愿问题,在中继选择算法中引入了社交域信息,并与没有引入社交域信息的方案进行了对比。仿真结果表明,相比于对比算法,所提算法在不考虑社交域信息时能够改善系统的吞吐量和能量效率,在考虑社交域信息时能够大幅提升系统的能量效率。

1 系统模型

1.1 网络基础设施模型

一个单小区蜂窝网络中的多跳 D2D 通信物理模型如图 1 所示,包括位于小区中心的基站(base station, BS),若干通过上行正交信道与基站通信的蜂窝设备(cellular equipment, CE),若干当前没有通信需求的空闲设备(idle equipment, IE),多跳 D2D 通信的源(source, S),多跳 D2D 通信的目的地(destination, D),以及若干为 S 和 D 之间的通信转发数据的中继(relay, R)设备。基站配备有全向天线,所有设备配备有两个天线且工作在全双工模式。

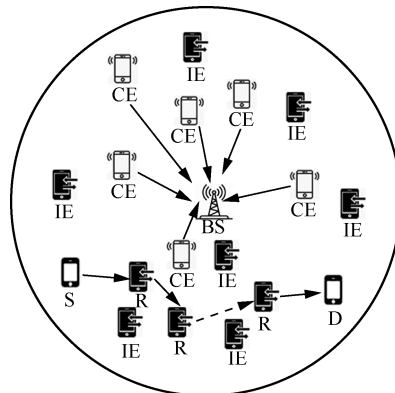


图 1 多跳 D2D 通信物理模型

1.2 信道模型

在本文中,假设所有信道均为瑞利衰落信道,同时考虑自由空间传播路径损耗,则任意一个节点 x 向另一个节点 y 发送信号时节点 y 的接收信号功率为:

$$P_x^y = P_x h_x^y (d_x^y)^{-\alpha} \quad (1)$$

其中, P_x 表示 x 的发射功率, h_x^y 表示 x 和 y 之间的信道增益, $h_x^y = |h_0|^2$ 且 $h_0 \sim \text{CN}(0,1)$, d_x^y 表示 x 和 y 之间的距离, α 表示路径损耗指数。

1.3 社交模型

在实际的 D2D 通信中进行中继选择时,由于自身有通信需求或电池电量有限等原因,持有中继设备的用户可能不愿意充当他人的中继,或者不愿意为转发他人的数据贡献太多的功率。但是,如果持有中继设备的用户和进行 D2D 通信的用户有亲密的社交关系,那么该用户就很有可能愿意充当中继或为转发 D2D 通信的数据贡献更多的功率。因此,在实际的系统中,有必要将社交域信息引入多跳 D2D 通信的中继选择算法中。

在现实生活中,两个关系密切的人之间一般会通过电话或社交软件等频繁地联系,并且每次联系时持续的时间比较长;而两个关系疏远的人之间一般很少联系,并且联系时持续的时间比较短。另一方面,考虑基站可以从数据库中获取用户的通话记录,并且在用户通过社交软件联系时可以很方便地记录次数、时长等数据,因此用持有设备的用户之



间通过电话或社交软件进行联系的次数和时长来量化他们之间的社交关系，具体的计算式如下：

$$u_{i,j} = \left(\frac{T_{i,j}}{\sum T_{i,k}} + \frac{D_{i,j}}{\sum D_{i,k}} \right) / 2 \quad (2)$$

其中， $u_{i,j}$ 表示用户 j 与用户 i 之间的社交关系强度， $T_{i,j}$ 表示用户 j 与用户 i 之间的总联系次数， $\sum T_{i,k}$ 表示用户 i 与所有用户进行过的联系的次数之和， $D_{i,j}$ 表示用户 j 与用户 i 之间的总联系时长， $\sum D_{i,k}$ 表示用户 i 与所有用户进行过的联系的时长之和。

根据文献[15]的研究，绝大多数用户之间的社交关系强度比较弱，只有少数用户与其他用户之间有着较强的社交关系，类似于帕累托分布。帕累托分布的概率密度函数如下：

$$f(u_{i,j} = x | k, x_{\min}) = \frac{k x_{\min}^k}{x^{k+1}}, x > x_{\min} \quad (3)$$

其中，尺度参数 $x_{\min} > 0$ 。

在本文中，用帕累托分布建模用户之间的社交关系强度，并规定中继的发射功率与他们和源、目的地之间的社交关系强度有关。用 $u_{S,j}$ 和 $u_{D,j}$ 分别表示设备 j 与 S 和 D 之间的社交关系强度，则由社交关系强度得到的设备 j 的发射功率为：

$$P'_j = \max \{u_{S,j}, u_{D,j}\} \cdot P_{\max} \quad (4)$$

其中， $\max \{\}$ 表示取最大值， $P_{\max}$ 表示中继的最大发射功率。

2 中继选择算法

在某个时刻设备 S 想要与 D 进行 D2D 通信，由于他们之间的距离过远，因此只能在多个中继的帮助下才能成功建立 D2D 通信。在这种情况下需要从源和目的地之间的空闲设备中选出合适的设备作为中继，帮助转发 S 和 D 之间的数据。但是 S 和 D 之间的空闲设备数量众多，而且不同的空闲设备作为中继时 D2D 通信链路的性能不同，因此如何选择中继成为一个重要的问题。本文提

出的中继选择算法主要由候选中继确定方法、被复用频谱的蜂窝设备确定方法以及中继选择算法执行方法 3 部分组成。

2.1 候选中继确定方法

毫无疑问，如果将源和目的地之间所有的空闲设备当作候选中继，并从中选出最佳的中继可以得到更准确的结果，但这样会导致算法复杂度过高，不利于实际应用。受多跳认知无线网络^[16]和认知中继网络^[17]中中继选择和路由策略方向相关研究的启发，同时为了减少算法复杂度，本文提出了一种基于中继簇 (cluster) 的候选中继确定方法，在中继选择时只把某些区域中的空闲设备当作候选中继，然后从中选出最后所需的中继。

假设 S 到 D 之间需要进行 M ($M \geq 3$) 跳 D2D 通信，则共需要从 $M-1$ 个中继簇中选出 $M-1$ 个空闲设备作为中继。中继簇的位置由 S 和 D 的位置以及事先设定的距离在 S 和 D 之间确定， S 和 D 之间的中继簇示意图如图 2 所示。每一个中继簇均为圆心在 S 和 D 的连线上、半径为 r 的圆形区域。第一个中继簇的圆心与 S 之间的距离为 r ，之后的每一个中继簇的圆心与前一个中继簇的圆心之间的距离为 L ($L > 2r$)， D 与最后一个中继簇的圆心之间的距离用 l 表示， $0 < l \leq L$ 。

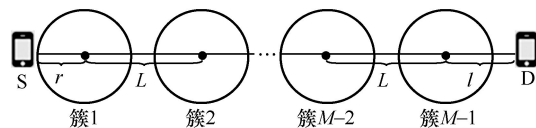


图 2 S 和 D 之间的中继簇示意图

2.2 被复用频谱的蜂窝设备确定方法

在本文中，为了提高频谱利用率，D2D 设备通过复用蜂窝设备的频谱实现通信。为了避免多跳链路之间的互干扰以及全双工带来的自干扰，D2D 通信的每一跳复用不同蜂窝设备的频谱，即中继工作在频分双工模式。另外，D2D 通信复用蜂窝设备的上行频谱，一方面复用下行频谱时蜂窝设备接收干扰信号，复用上行频谱时基站接收

干扰信号, 而基站处理干扰的能力一般强于蜂窝设备; 另一方面, 相比于下行频谱, 上行频谱通常未被充分利用^[18]。另外, D2D 通信的每一跳复用不同蜂窝设备的频谱, 所以虽然在本文的模型中所有中继均工作在全双工模式, 但各跳的信道干扰情况可以单独分析。多跳 D2D 通信第 m 跳干扰示意图如图 3 所示, 假设 T_m 和 R_m 分别为多跳 D2D 通信第 m 跳的发射设备和接收设备, C_m 为该跳复用的频谱所对应的蜂窝设备。

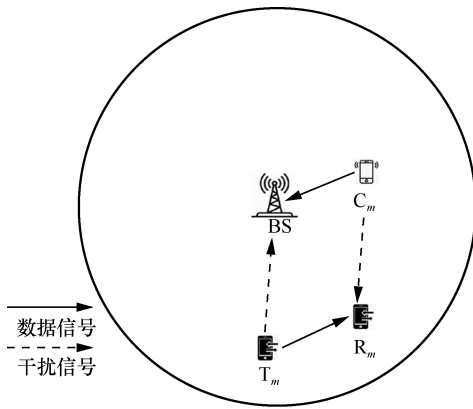


图 3 多跳 D2D 通信第 m 跳干扰示意图

为了保证蜂窝设备的正常通信, BS 从 C_m 处接收的信号的信干噪比 ($\text{SINR}_{C_m}^{\text{BS}}$) 需要达到一定的门限值, 即:

$$\text{SINR}_{C_m}^{\text{BS}} = \frac{P_{C_m} (d_{C_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{C_m}^{\text{BS}}}{P_{T_m} (d_{T_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{T_m}^{\text{BS}} + N_0} \geq r_{\text{th}} \quad (5)$$

其中, P_{C_m} 表示 C_m 的发射功率 (假设对于所有 m , P_{C_m} 均等于 P_C), P_{T_m} 表示 T_m 的发射功率, $d_{C_m}^{\text{BS}}$, $h_{C_m}^{\text{BS}}$ 分别表示 C_m 和 BS 之间的距离和信道增益, $d_{T_m}^{\text{BS}}$, $h_{T_m}^{\text{BS}}$ 分别表示 T_m 和 BS 之间的距离和信道增益, r_{th} 表示 BS 能正确解码 C_m 发送的信号所需要的最小信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR), N_0 表示背景高斯白噪声的功率。由式 (5) 可以得到:

$$P_{T_m} \leq \frac{P_{C_m} (d_{C_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{C_m}^{\text{BS}} - N_0}{(d_{T_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{T_m}^{\text{BS}}} \quad (6)$$

取:

$$P_{T_m} = \frac{P_{C_m} (d_{C_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{C_m}^{\text{BS}} - N_0}{(d_{T_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{T_m}^{\text{BS}}} \quad (7)$$

可以看出, P_{T_m} 随 $d_{C_m}^{\text{BS}}$ 的减小而增大。式 (7) 保证了式 (5) 的成立, 即 $\text{SINR}_{C_m}^{\text{BS}}$ 必定能够达到门限值。而 R_m 从 T_m 处接收的信号的信干噪比 (SINR) 为:

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{T_m}^{R_m} &= \frac{P_{T_m} (d_{T_m}^{R_m})^{-\alpha} h_{T_m}^{R_m}}{P_{C_m} (d_{C_m}^{R_m})^{-\alpha} h_{C_m}^{R_m} + N_0} = \\ &= \frac{P_{C_m} (d_{C_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{C_m}^{\text{BS}} - r_{\text{th}} N_0}{r_{\text{th}} (d_{T_m}^{\text{BS}})^{-\alpha} h_{T_m}^{\text{BS}}} \frac{(d_{T_m}^{R_m})^{-\alpha} h_{T_m}^{R_m}}{P_{C_m} (d_{C_m}^{R_m})^{-\alpha} h_{C_m}^{R_m} + N_0} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $d_{T_m}^{R_m}$, $h_{T_m}^{R_m}$ 分别表示 T_m 和 R_m 之间的距离和信道增益, $d_{C_m}^{R_m}$, $h_{C_m}^{R_m}$ 分别表示 C_m 和 R_m 之间的距离和信道增益。可以看出 $\text{SINR}_{T_m}^{R_m}$ 随 P_{T_m} 和 $d_{C_m}^{R_m}$ 的增加而增加。根据香农公式, 该跳的吞吐量与 $\text{SINR}_{T_m}^{R_m}$ 直接相关, 为了提高该跳的吞吐量, 可以通过增加 P_{T_m} (即减小 $d_{C_m}^{\text{BS}}$) 或增加 $d_{C_m}^{R_m}$ 实现。另外, 考虑 T_m 与基站之间的距离太近 (即 $d_{T_m}^{\text{BS}}$ 值太小) 时会对基站造成严重的干扰, 所以本文设置一个以基站为圆心、半径为 R 的圆形保护区域, 并规定在该区域内不允许进行 D2D 通信。

综上所述, 多跳 D2D 通信第 m 跳复用蜂窝设备选择示意图如图 4 所示, 做一直线连接 R_m 所在中继簇的圆心和基站并反向延长 (在最后一跳 R_m 即是 D, 中继簇的圆心即是 D 的位置), 以延长线上一点为圆心、 $r/2$ 为半径做一与保护区域边界内切的圆, 从该圆形区域内的蜂窝设备中选出到基站的接收信号功率最大的蜂窝设备作为第 m 跳复用的蜂窝设备。合理地设置 R 的数值既能避免 D2D 对基站造成严重的干扰, 又能减小 $d_{C_m}^{\text{BS}}$, 增加 $d_{C_m}^{R_m}$, 由式 (8) 可知第 m 跳的 $\text{SINR}_{T_m}^{R_m}$ 将增加,



即该跳的吞吐量将增加。综上所述, 根据上述过程选取的蜂窝设备可以改善 D2D 链路的吞吐量性能, 同时又能保证蜂窝设备的 QoS。

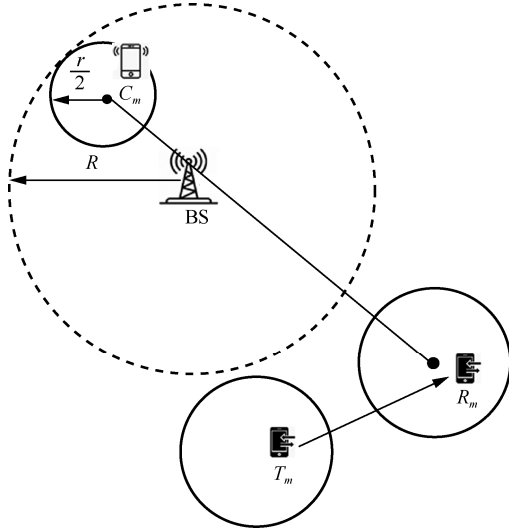


图4 多跳 D2D 通信第 m 跳复用蜂窝设备选择示意图

2.3 中继选择算法执行方法

多跳 D2D 通信在每一跳中既要从中继簇中的多个空闲设备中选出中继, 又要从蜂窝设备中选出被复用频谱的设备, 涉及的设备数量过多, 如果完全由基站以集中式完成中继选择过程, 必然会给基站带来过量负载和大量信令开销。本文提出的中继选择算法能够以半集中式的方式执行, 基站只需完成 D2D 多跳通信开始时的信道参数、节点位置等信息的收集及少量的数据处理, 中继选择则由参与多跳 D2D 通信的设备自行完成。

假设 S 和 D 之间的 D2D 通信总共 M 跳, 则需要复用 M 个蜂窝设备的频谱, 用 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}$ 表示第一跳到第 M 跳复用的频谱。另外需要 $M-1$ 个中继设备, 这 $M-1$ 个中继设备从 $M-1$ 个中继簇中选出, 从簇 1 到簇 $M-1$ 确定的中继分别用 $R_1, R_2, \dots, R_{M-1}$ 表示, 每个中继簇中有 N 个空闲设备作为候选中继。用 $P'_{n,m}$ 表示由式 (4) 得到的第 m 个中继簇中第 n 个空闲设备在考虑社交关系的情况下的发射功率, 用 $P' = \{P'_{1,1}, \dots, P'_{n,m}, \dots, P'_{N,M-1}\}$ 表示各中继簇内的

空闲设备在考虑社交关系情况下的发射功率集。用 $P'_{n,m}$ 表示由式 (7) 得到的第 m 个中继簇中第 n 个空闲设备在考虑干扰的情况下的最大发射功率。

忽略设备发现过程, 具体的中继选择过程如下。

步骤 1 S、D 发送 D2D 多跳通信请求到 BS。

步骤 2 BS 首先确定 S、D 的位置, 然后根据第 2.1 节的方法确定各中继簇的位置、范围、其中包含的空闲设备和各空闲设备的位置, 并通知各中继簇中的空闲设备其已被选作对应簇中的候选中继。接着根据数据库内的通话记录计算所有空闲设备与 S 和 D 的社交关系并得到集合 P' , 根据 D 及各簇的位置由第 2.2 节的方法确定各跳复用频谱对应的蜂窝设备共 M 个, 记录这些蜂窝设备的频谱 F 。最后, BS 记录 S、各簇中的空闲设备与 BS 之间的信道增益, 连同 S、D 和各簇中空闲设备的位置以及集合 P' 、 F 发送给 D。

步骤 3 D 将从 BS 处接收的数据发送给簇 $M-1$ 中的空闲设备并将自己信号接收频率设为 f_m 。

步骤 4 簇 $M-1$ 中的各空闲设备根据式 (7) 计算在考虑干扰的情况下其发射功率最大值 $\{P'_{1,M-1}, \dots, P'_{N,M-1}\}$, 然后取 $\{P_{1,M-1}, \dots, P_{N,M-1}\} = \min\{\{P'_{1,M-1}, \dots, P'_{N,M-1}\}, \{P''_{1,M-1}, \dots, P''_{N,M-1}\}\}$, $\min\{\{\cdot\}, \{\cdot\}\}$ 表示取集合对应元素最小值。假设簇 $M-1$ 中的各空闲设备在从 D 处收到数据的同时可以获得他们与 D 之间的信道增益, 则根据 $\{P_{1,M-1}, \dots, P_{N,M-1}\}$ 、簇 $M-1$ 中的各空闲设备到 D 的信道增益由式 (1) 可得到他们发送信号给 D 时 D 的接收信号功率。然后各个空闲设备开启一个终止时间与其到 D 的接收信号功率成反比的计时器, 接收信号功率最大的空闲设备的计时器最先结束, 该设备即 R_{M-1} 。然后 R_{M-1} 向簇 $M-1$ 中的其他空闲设备广播一条自己已被选作中继的消息, 簇 $M-1$ 中的其他空闲设备遂停止计数并得知自己未被选中。最后 R_{M-1} 将从 D 处接收到的数据发送给簇 $M-2$ 中的空闲设备, 并将自己的信号发送频率设为 f_M , 信号接收频率设为 f_{M-1} 。

步骤 5 各簇中的空闲设备重复步骤 4 中的处理过程直至 S 根据式 (7) 确定其发射功率, 并将其信号发送频率设为 f_1 。

步骤 6 S 开始 D2D 通信。

可以看出, 根据上述步骤确定多跳通信链路后, 每一跳的 SINR 也即确定, 故可用香农公式计算每一跳的吞吐量。假设蜂窝设备频谱带宽用 B 表示, 则第一跳的吞吐量为:

$$\Omega_1 = B \cdot \lg \left(1 + \frac{P_S (d_S^{R_1})^{-\alpha} h_S^{R_1}}{P_{C_1} (d_{C_1}^{R_1})^{-\alpha} h_{C_1}^{R_1} + N_0} \right) \quad (9)$$

中间第 m 跳的吞吐量为:

$$\Omega_m = B \cdot \lg \left(1 + \frac{P_{R_{m-1}} (d_{R_{m-1}}^{R_m})^{-\alpha} h_{R_{m-1}}^{R_m}}{P_{C_m} (d_{C_m}^{R_m})^{-\alpha} h_{C_m}^{R_m} + N_0} \right), m = 2, \dots, M-1 \quad (10)$$

最后一跳的吞吐量为:

$$\Omega_M = B \cdot \lg \left(1 + \frac{P_{R_{M-1}} (d_{R_{M-1}}^D)^{-\alpha} h_{R_{M-1}}^D}{P_{C_M} (d_{C_M}^D)^{-\alpha} h_{C_M}^D + N_0} \right) \quad (11)$$

由于所有中继设备均工作在全双工模式, 因此整条多跳 D2D 通信链路的吞吐量由吞吐量最小的那一跳的吞吐量决定, 即多跳 D2D 通信的吞吐量为:

$$\Omega = \min \{\Omega_1, \dots, \Omega_m, \dots, \Omega_M\} \quad (12)$$

3 仿真结果及分析

本节给出所提出的算法通过仿真得到的数值结果, 并与对比算法进行比较。仿真模拟了一个半径为 500 m、以配备全方向天线的基站为中心的圆形单小区蜂窝场景, 蜂窝设备和空闲设备在小区内随机均匀分布。详细的仿真参数及其取值见表 1。仿真中的社交感知 (social awareness, SA) 和非社交感知 (social unawareness, SUA) 算法为本文所提算法, SA 算法中空闲设备的发射功率既

考虑对蜂窝设备的干扰、同时也考虑社交关系, SUA 算法中空闲设备的发射功率只考虑对蜂窝设备的干扰, 不考虑社交关系; MLS⁰ (max link selection, 最大链路选择)、HTPRS⁰ (highest transmit power relay selection, 最大发射功率中继选择) 为对比算法, 由于认知无线网络中的一些多跳中继选择算法所考虑的系统模型与本文的系统模型类似, 因此 MLS 和 HTPRS 均选自认知无线网络相关文献。

表 1 仿真参数及其取值

仿真参数	数值
蜂窝频谱带宽 B/MHz	1
路径损耗指数 α	3
背景噪声功率谱密度 $(\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-174
蜂窝设备发射功率 P_C/dBm	23
中继最大发射功率 $P_{\max}/\text{dBm}$	23
蜂窝设备 SINR 门限值 r_{th}/dB	9
相邻中继簇间距离 L/m	60
中继簇半径 r/m	20
保护区域半径 R/m	100
帕累托分布参数 k	1 500
帕累托分布参数 $x_{\min}$	0.1

不同 S 和 D 间距离下算法吞吐量比较如图 5 所示, 可以看出所有算法的吞吐量均随着距离的增加而减少, 这是因为随着距离的增加, 所增加的跳只会导致各跳吞吐量的最小值不变或减少, 所以整条链路的吞吐量会相应减少。在距离相等的情況下 SUA 算法的吞吐量高于 MLS 和 HTPRS, 这是因为 SUA 算法选择中继的指标与每一跳的 SINR 直接相关, 能够选出性能更好的中继。而在距离相等的情况下 SA 算法的吞吐量不如 SUA, 这是因为 SA 算法对所有空闲设备的发射功率施加了额外的社交关系约束, 所以 SA 算法选出的中继的发射功率必定小于 SUA 算法选出的中继。

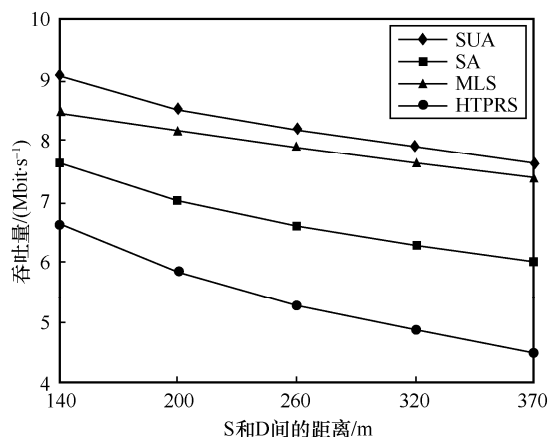


图5 不同S和D间距离下算法吞吐量比较

不同中继簇中空闲设备数量下算法吞吐量比较如图6所示。结果表明, SUA、SA和MLS 3种算法的吞吐量均随着空闲设备数量的增加而增加, 这是因为随着空闲设备数量的增加, 这3种算法能有更大的概率选出性能更好的空闲设备作为中继, 而HTPRS算法选择中继时随机性更大, 无法利用更多的空闲设备这一优势。在空闲设备数量相同的情况下SUA算法的吞吐量大于MLS和HTPRS的吞吐量, 而SA算法的吞吐量不如SUA算法的吞吐量。

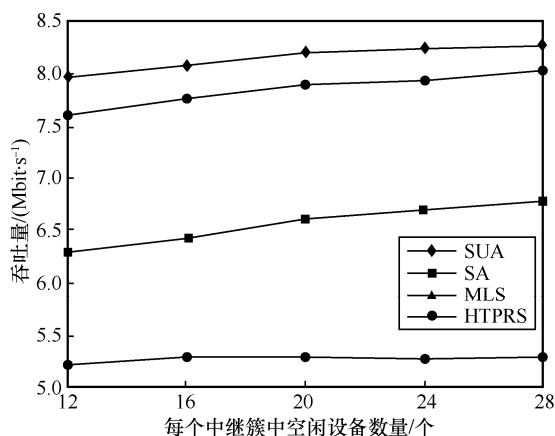


图6 不同中继簇中空闲设备数量下算法吞吐量比较

不同S和D间距离下算法能量效率比较如图7所示, 能量效率定义为链路吞吐量与所有参与多跳D2D通信的设备的实际发射功率之和的比。结果表明所有算法的能量效率均随着距离的增加而减少, 这是因为随着距离的增加参与D2D通信的

中继数量也在增加, 这导致发射功率之和随之增加, 而所有算法的吞吐量随着距离的增加而减小, 因此能量效率减小。在距离相等的情况下SUA算法的能量效率优于MLS和HTPRS, 而SA算法的能量效率远远超过其他3种算法。这是由于SA算法通过对所有空闲设备施加额外的社交关系约束, 减少了每一跳被选出的中继的发射功率, 因此发射功率之和大幅减少, 虽然SA算法比SUA的吞吐量要低, 它的能量效率却远远超过了另外3种算法。

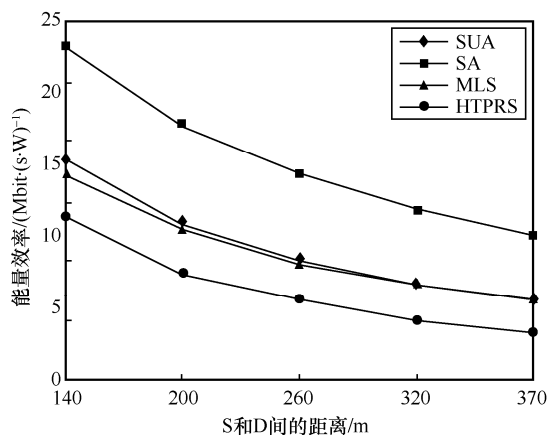


图7 不同S和D间距离下算法能量效率比较

不同中继簇中空闲设备数量下算法能量效率比较如图8所示。结果表明SUA、SA和MLS 3种算法的能量效率均随空闲设备数量的增加而增加, HTPRS的能量效率均随空闲设备数量的增加基本保持不变。在空闲设备数量相同的情况下SUA的能量效率优于MLS和HTPRS, 而SA算法的能量效率远远超过其他3种算法。

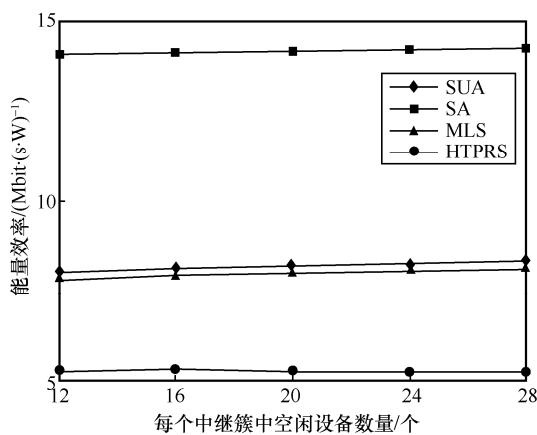


图8 不同中继簇中空闲设备数量下算法能量效率比较

SA 和 SUA 算法性能比较见表 2, 总结了 SA 和 SUA 两种算法在不同 S 和 D 之间距离下的性能比较。可以看出, SA 和 SUA 两种算法在吞吐量和能量效率两方面的性能差异很大, 且在能量效率方面 SA 相比于 SUA 有很大优势, 因此在 D2D 中继选择算法的研究中不能忽略社交域信息的作用。

表 2 SA 和 SUA 算法性能比较

S 和 D 间 距离/m	吞吐量比较 (SUA/SA)	能量效率比较 (SA/SUA)
140	119.0%	152.1%
200	121.5%	164.1%
260	124.2%	172.4%
320	125.5%	177.1%
380	127.3%	181.0%

4 结束语

本文提出了一种用于单小区蜂窝网络下多跳 D2D 通信的中继选择算法。首先在算法中引入了持有设备的用户之间的社交关系, 以解决设备充当中继时的意愿问题, 并使算法更具有现实意义; 其次为了提高多跳 D2D 链路的吞吐量, 不同于以往假设中继是半双工设备的研究, 本文的模型基于全双工中继; 然后为了避免全双工带来的严重的干扰, 令中继工作在频分双工模式; 最后通过合理设计, 算法能够在较少依赖基站的情况下运行, 有利于实际工程实现。蒙特卡洛仿真验证了所提算法的性能。仿真结果表明所提算法在不考虑社交关系信息时吞吐量和能量效率均优于对比算法, 在考虑社交关系信息时吞吐量会小幅下降, 但能量效率会大幅提高。这使本文所提算法在电池技术没有突破性进展和倡导节能减排的今天具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco annual internet report (2018–2023) white paper[R]. 2020.
- [2] SONG X, HAN X W, NI Y, et al. Joint uplink and downlink resource allocation for D2D communications system[J]. Future Internet. 2019, 11(1): 1-15.
- [3] 丁一凡, 李光球, 李辉. NOMA-D2D 协作无线系统的物理层安全[J]. 电信科学, 2022: 1-16.
DING Y F, LI G Q, LI H. Physical layer security of NOMA-D2D cooperative wireless system[J]. Telecommunications Science, 2022: 1-16.
- [4] JAMEEL F, HAMID Z, JABEEN F, et al. A survey of device-to-device communications: research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2133-2168.
- [5] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [6] AMODU O A, OTHMAN M, NOORDIN N K, et al. Relay-assisted D2D underlay cellular network analysis using stochastic geometry: overview and future directions[J]. IEEE Access, 2019(7): 115023-115051.
- [7] MA X R, YIN R, YU G D, et al. A distributed relay selection method for relay assisted device-to-device communication system[C]//Proceedings of 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1020-1024.
- [8] MISHRA P K, PANDEY S, BISWASH S K. A device-centric scheme for relay selection in a dynamic network scenario for 5G communication[J]. IEEE Access, 2016(4): 3757-3768.
- [9] SHAIKH F S, WISMULLER R. Routing in multi-hop cellular device-to-device (D2D) networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2622-2657.
- [10] BHARDWAJ V, MURTHY C R. On optimal routing and power allocation for D2D communications[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2015: 3063-3067.
- [11] YUAN H, GUO W S, JIN Y L, et al. Interference-aware multi-hop path selection for device-to-device communications in a cellular interference environment[J]. IET Communications, 2017, 11(11): 1741-1750.
- [12] ZHANG Z F, ZHANG P R, LIU D, et al. SRSM-based adaptive relay selection for D2D communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017(5):2323-2332.
- [13] LI Y, ZHANG Z F, WANG H G, et al. SERS: social-aware energy-efficient relay selection in D2D communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(6):5331-5345.
- [14] CHEN G J, TANG J C, COON J P. Optimal routing for multihop social-based D2D communications in the Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1880-1889.



- [15] LI H X, WU C, LI Z P, et al. Stochastic optimal multirate multicast in socially selfish wireless networks[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2012: 172-180.
- [16] BODDAPATI H K, BHATNAGAR M R, PRAKRIYA S. Performance of cooperative multi-hop cognitive radio networks with selective decode-and-forward relays[J]. IET Communications, 2018, 12(20): 2538-2545.
- [17] SUN H, NARAGHI-POUR M, SHENG W X, et al. A hop-by-hop relay selection strategy in multi-hop cognitive relay networks[J]. IEEE Access, 2020(8): 21117-21126.
- [18] CHEN Z W, ZHAO S, SHAO S X. Research on relay selection in device-to-device communications based on maximum capacity[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1429-1434.
- [19] BODDAPATI H K, BHATNAGAR M R, PRAKRIYA S. Performance analysis of cluster-based multi-hop underlay CRNs using max-link-selection protocol[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 4(1): 15-29.

- [20] BODDAPATI H K, BHATNAGAR M R, PRAKRIYA S. Ad-hoc relay selection protocols for multi-hop underlay cognitive radio networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[作者简介]



李良 (1997-), 男, 宁波大学硕士生, 主要研究方向为 D2D 通信技术。



杨新杰 (1971-), 男, 宁波大学信息科学与工程学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为下一代移动通信系统架构、移动物联网接入技术、协作中继网络性能等。