

基于蜂窝网络的D2D通信传输模式选择方案

王玉玺¹ 刘娅璇¹ 徐嘉懿¹ 张楠¹ 倪艺洋^{1,2} 朱洪波²

(1. 江苏第二师范学院数学与信息技术学院, 南京, 210013; 2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 南京, 210003)

摘要: D2D技术作为5G通信的一项关键技术,其优势之一为利用D2D用户间的短距离通信来提高端到端的传输速率。而当D2D用户间距离较大时,由于用户发射功率有限,这一特性不再凸显。本文考虑利用中继技术增强D2D链路的性能。在传统D2D通信模型的基础上,本文进一步分析研究了放大转发(Amplify-and-forward, AF)和译码转发(Decode-and-forward, DF)两种中继辅助下的D2D通信模型,并提出了相应的模式间选择方案。特别地,该模式选择方案以闭式解的形式表述,且仅包含基本数学表达式。仿真结果表明,采用本文所提出的模式选择方案后,随着系统参数的变化,系统始终选择性能最优的通信模式进行端到端的通信,系统性能得到了显著提升。

关键词: D2D通信;放大转发中继;译码转发中继;可达速率;模式选择方案

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A

Transmission Mode Selection Scheme for D2D Communications Underlying Cellular Networks

Wang Yuxi¹, Liu Yaxuan¹, Xu Jiayi¹, Zhang Nan¹, Ni Yiyang^{1,2}, Zhu Hongbo²

(1. Collage of Mathematics and Information Technology, Jiangsu Second Normal University, Nanjing, 210013, China; 2. Key Laboratory of Wireless Communications of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China)

Abstract: Device-to-device (D2D) communication has attracted a lot of attention since it is considered as a key technology for 5G. The high rate can be obtained by the short distance between D2D users. However, this superiority will be lost when the distance between D2D users increases, since the transmit power of user is limited. Motivated by these, in order to improve the performance of D2D link, this paper investigates the D2D communication assisted with another D2D user working as a relay node. We consider three modes including traditional D2D communication, amplify-and-forward (AF) relay node assisted D2D communication and D2D communication aided by decode-and-forward (DF) relay node. In this paper, we analyze the achievable rate of each mode, and propose a mode selection scheme which is presented with closed-form expressions, which include only elementary functions. The mode selection scheme guarantees the D2D link always achieves the maximum rate of three modes. Numerical results show the significantly enhanced performance with the mode selection scheme.

Key words: D2D communication; AF relay; DF relay; achievable rate; mode selection scheme

基金项目:国家自然科学基金(61701201)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20170758)资助项目;江苏省高等学校自然科学研究面上项目(17KJB510011)资助项目;江苏省无线通信重点实验室(2017WICOM02)资助项目。

收稿日期:2019-03-01; **修订日期:**2019-09-24

引言

随着近年移动终端数量的爆发式增长以及频谱资源的日益紧缺,传统蜂窝通信网络已无法满足未来用户的需求,D2D(device-to-device)技术作为5G通信的关键技术之一,得到了越来越广泛的关注^[1-2]。距离较近的D2D用户通过复用蜂窝网络中已授权的频谱资源进行直接通信,在实现资源共享、缓解频谱资源匮乏的同时,提高了数据传输速率,降低了系统能耗,系统容量也得到了显著增加^[2-3]。

为进一步提高数据传输速率,增强远距离通信网络的性能,中继技术在4G通信中得到了广泛的应用^[4]。放大转发(Amplified-and-forward,AF)和译码转发(Decode-and-forward,DF)是目前中继技术中常用的两种中继协议,其最大的区别在于处理信号的方式不同,AF中继技术采用一种较简单的信号处理方式,中继节点将接收到的有用信号、干扰以及噪声进行放大后转发给目标用户。利用AF中继,在降低系统传输时延,实现空间分集的同时,也因无法将信号和噪声分离而降低了信道质量。不同于AF中继协议,DF中继技术将接收到的信号解码后进行转发,有效抑制噪声,但因其过程的复杂增加了传输时延。在蜂窝网络中,已有研究者分析比较了AF和DF两种中继技术在误码率以及能量消耗方面的优劣^[5-7]。也有研究者从传输数据保密约束的角度,提出了中继选择的3个原则:最小选择、常规选择和最优选择^[8]。为满足5G通信技术对高速率、低延迟以及大容量等方面的需求,将中继技术与D2D技术有效结合成为了当今研究热点。

D2D技术的优势在于,在实现时频资源共享的同时利用用户间距离近的特点实现高速数据传输,然而当D2D用户间的距离增大到一定程度时,由于D2D用户的发射功率有限,链路质量急剧下降,将中继技术与D2D技术相结合能有效提高D2D链路的传输速率并增大小区的覆盖范围。针对中继辅助的D2D通信场景,已有研究者在蜂窝系统所受干扰值一定的情况下最大化D2D链路吞吐量并筛选出最优中继节点,以提高D2D链路的发送功率^[9]。文献[10]中提出了一种基于5G蜂窝网络的D2D中继选择方案,以优化频谱效率和覆盖范围。此外,还有研究者考虑在不完全信道状态信息下将功率分配与模式选择相结合^[11],以提高资源利用率和系统吞吐量并有效降低系统能耗。文献[12]提出了一种等效中继选择算法,以降低D2D链路对蜂窝链路的干扰,有效提高了系统能效。文献[13]探讨了基于中继的D2D通信系统的功率分配问题,提出了迭代算法和突发流量模式下的自适应模式选择方案。另有研究者指出,在蜂窝下行链路中利用MIMO技术,可以有效提升信道容量以及系统可靠性^[14]。文献[15]将中继选择问题转换成组合优化问题,提出了基于匹配理论的中继选择算法,有效地减少了信道中的不确定性误差。在D2D模式选择上,已有研究者对不同的条件约束展开研究,文献[16]的研究者以蜂窝用户与D2D用户之间的位置关系为参量,进行了通信模式选择的研究,并在引入中继节点后进一步分析了D2D用户采用Underlay模式通信的概率与信干噪比门限值之间的关系。文献[17]研究了基于交通状态和突发交通模型的上传/下载等3种D2D传输模式,提出了一种自适应模式选择方案,旨在提高突发流量模型的系统传输速率。文献[18]在保证D2D链路和蜂窝链路基本通信性能的基础上,研究了D2D下层蜂窝通信系统的联合模式选择、资源组分配和功率分配,旨在最大化系统总可达速率。基于此,本文提出了D2D通信中多种传输模式间的模式选择方案,包括基于AF中继的D2D通信模式、基于DF中继的D2D通信模式以及传统D2D通信模式。

1 系统模型

对于位于小区边缘的用户,由于其距离基站远、信道质量差,通信质量无法得到保障。针对此类用户,可采用D2D方式进行直接通信,以提高用户间的通信质量、提升系统容量。当直接通信的两用户相距较远(例如位于两相邻小区)时,可利用D2D用户作为中继用户进行辅助通信,以提升链路质量。如

图1所示,用户 UE_1, UE_2 分别位于小区1和小区2的边缘,为提高链路质量,增加系统容量, UE_1 与 UE_2 间采用D2D方式通过复用蜂窝用户的时频资源进行直接通信。为方便表示,本文用 M_A, M_B 和 M_C 分别表示传统D2D通信模式、基于AF中继的D2D通信模式和基于DF中继的D2D通信模式。其中, M_B 与 M_C 利用位于两小区覆盖重叠处的用户 (UE_R) 作为中继用户,辅助 UE_1 与 UE_2 进行通信。两者区别在于采用的中继协议不同, M_B 中 UE_R 采用AF协议, M_C 中 UE_R 采用DF协议。特别地,本文中考虑D2D用户位于不同小区,当D2D用户位于同一小区时,干扰将更为简单,只需修改最终表达式中的干扰项即可。

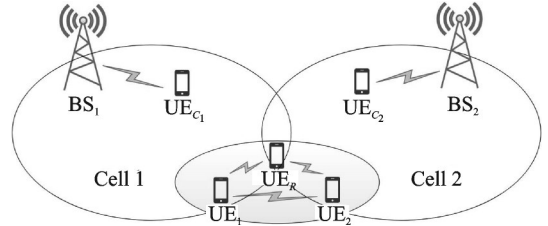


图1 系统模型图
Fig.1 System model

本文用 $P_{iT} (i=B_k, C_k, 1, 2, R; k=1, 2)$ 表示终端 i 的发射功率,其中 B_k 表示小区 k 中的基站 BS_k, C_k 表示小区 k 中的蜂窝用户,1,2 分别表示 UE_1 和 UE_2, R 表示 UE_R ; 用 n_i 表示终端 i 处的噪声,满足 $n_i \sim N(0, N_0)$; 用 $h_{ij} (j=B_k, C_k, 1, 2, R; j \neq i)$ 表示 $i-j$ 链路的信道系数;以 d_{ij} 表示终端 i 与终端 j 间的距离, α 表示路径损耗系数。为方便计算,本文中假设基站发射功率相等,假设同一类型用户的发射功率相等。

2 可达速率

为求出3种传输模式下系统可达速率的闭合表达式,本节首先分析各模式下链路的干扰情况,据此写出接收端的SINR表达式,并进一步求得系统在各模式下的可达速率。

2.1 传统D2D通信模式 M_A

M_A 模式第1时隙中 UE_1 发送信号给 UE_2 , 同时 UE_{C_1} 和 UE_{C_2} 分别向各自小区的基站发送信号。第2时隙, UE_2 向 UE_1 发送信号,同时 BS_1, BS_2 发送信号给各自服务的蜂窝用户。由于D2D链路复用了蜂窝链路的时频资源,两条链路之间存在相互干扰。由于D2D用户距离基站较远,且D2D用户间的距离较近,本文假设D2D用户到各自所在小区基站的距离相等,中继用户到两D2D用户之间距离近似相等,即 $d_{1R} \approx d_{2R} = d_{DR}$ 。为方便表述,本文定义 $g = (d_0/d_{DR})^{-\alpha}$, 其中 d_0 为归一化参考距离。由此可得出 M_A 第一时隙 UE_1 - UE_2 链路的接收信干噪比(Signal to interference plus noise ratio, SINR)为

$$\gamma_{11}^{M_A} = \frac{P_{DT} g |h_{12}|^2}{2^\alpha (P_{CT} d_{C_1 2}^{-\alpha} |h_{C_1 2}|^2 + P_{CT} d_{C_2 2}^{-\alpha} |h_{C_2 2}|^2 + N_0)} \quad (1)$$

同理,第2时隙 UE_1 - UE_2 链路的接收 SINR 可表示为

$$\gamma_{12}^{M_A} = \frac{P_{DT} g |h_{12}|^2}{2^\alpha (P_{BT} d_{B_2 1}^{-\alpha} |h_{B_2 1}|^2 + P_{BT} d_{B_1 1}^{-\alpha} |h_{B_1 1}|^2 + N_0)} \quad (2)$$

根据式(1,2)可以写出 M_A 的可达速率

$$R^{M_A}(g) = \frac{1}{2} E \left[\log \left(1 + \frac{P_{DT} g |h_{12}|^2}{2^\alpha (P_{CT} d_{C_1 2}^{-\alpha} |h_{C_1 2}|^2 + P_{CT} d_{C_2 2}^{-\alpha} |h_{C_2 2}|^2 + N_0)} \right) \right] + \frac{1}{2} E \left[\log \left(1 + \frac{P_{DT} g |h_{12}|^2}{2^\alpha (P_{BT} d_{B_2 1}^{-\alpha} |h_{B_2 1}|^2 + P_{BT} d_{B_1 1}^{-\alpha} |h_{B_1 1}|^2 + N_0)} \right) \right] \quad (3)$$

结合 Jensen 不等式

$$E[\log(1+x)] \leq \log(1+E[x]) \quad (4)$$

可将式(3)化简为

$$R^{M_A}(g) = \frac{1}{2} \left[\log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(V_C + N_0)} \right) + \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(V_B + N_0)} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $V_C = P_{CT}d_{C_1,2} + P_{CT}d_{C_2,2}$, $V_B = P_{BT}d_{B_2,1} + P_{BT}d_{B_1,1}$ 。

2.2 基于AF中继的D2D通信模式 M_B

当D2D用户距离较远时,可将 UE_R 作为中继用户并采用AF协议进行辅助通信。在此模式中,第1时隙 UE_1 发送信号给 UE_R ,与此同时 UE_{C_1} 和 UE_{C_2} 分别向各自基站发送信号。第2时隙, UE_R 将接收到的信号进行放大后转发给 UE_2 ,与此同时 BS_1, BS_2 服务于各自的蜂窝用户。可以写出 M_B 中 UE_1 - UE_2 链路的接收SINR为

$$\gamma^{M_B} = \frac{P_{DT}g^2G^2}{G^2gN_0 + P_{CT}d_{C_1,R}^{-\alpha}gG^2 + P_{CT}d_{C_2,R}^{-\alpha}gG^2 + P_{BT}d_{B_2,2}^{-\alpha} + N_0} \quad (6)$$

可达速率可表示为

$$R^{M_B}(g) = \log \left(1 + \frac{P_{DT}g^2G^2}{G^2gN_0 + P_{CT}d_{C_1,R}^{-\alpha}gG^2 + P_{CT}d_{C_2,R}^{-\alpha}gG^2 + P_{BT}d_{B_2,2}^{-\alpha} + N_0} \right) \quad (7)$$

式中:放大系数 $G = \sqrt{\frac{P_{RT}}{P_{DT}|h_{1R}|^2 + P_{C_1T}|h_{C_1T}|^2 + P_{C_2T}|h_{C_2T}|^2 + N_0}}$ 。

2.3 基于DF中继的D2D通信模式 M_C

与 M_B 不同, M_C 中采用DF中继协议进行辅助传输,采用与2.2节中类似的分析方法,可得出 M_C 中 UE_1 - UE_R 链路的接收SINR为

$$\gamma_R^{M_C} = \frac{P_{DT}g}{P_{CT}d_{C_1,R}^{-\alpha} + P_{CT}d_{C_2,R}^{-\alpha} + N_0} \quad (8)$$

UE_R - UE_2 链路的接收SINR可表示为

$$\gamma_2^{M_C} = \frac{P_{RT}g}{P_{BT}d_{B_2,2}^{-\alpha} + N_0} \quad (9)$$

基于DF中继的D2D通信模式下的可达速率可进一步表示为

$$R^{M_C}(g) = \frac{1}{2} \min \left[\log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{P_{CT}d_{C_1,R}^{-\alpha} + P_{CT}d_{C_2,R}^{-\alpha} + N_0} \right), \log \left(1 + \frac{P_{RT}g}{P_{BT}d_{B_2,2}^{-\alpha} + N_0} \right) \right] \quad (10)$$

式(10)可进一步写为

$$R^{M_C}(g) = \begin{cases} \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{\sum I_C + N_0} \right) & \sum I_C \geq \sum I_B \\ \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{\sum I_B + N_0} \right) & \sum I_C < \sum I_B \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sum I_C = P_{CT}d_{C_1,R}^{-\alpha} + P_{CT}d_{C_2,R}^{-\alpha}$ 表示蜂窝用户对D2D链路的干扰, $\sum I_B = P_{BT}d_{B_2,2}^{-\alpha}$ 表示基站对D2D链路的干扰。

综合式(5,7,11),D2D用户在3种传输模式下的可达速率归纳为

$$R_{\text{sum}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(V_C + N_0)} \right) + \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(V_B + N_0)} \right) & M_A \\ \log \left(1 + \frac{P_{DT}g^2G^2}{G^2g(\sum I_C + N_0) + \sum I_B + N_0} \right) & M_B \\ \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{DT}g}{\sum I_C + N_0} \right) & M_C \text{ 且 } \sum I_C \geq \sum I_B \\ \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_{RT}g}{\sum I_B + N_0} \right) & M_C \text{ 且 } \sum I_C < \sum I_B \end{cases} \quad (12)$$

3 模式选择方案

为得到3种通信模式间的模式选择方案,本文首先依据式(12)中各模式的可达速率表达式求出模式间的交点,进而选择最佳的传输模式,使得D2D链路在不同的系统参数下,均能获得最大传输速率。

从式(12)中不难看出, \$M_A\$ 和 \$M_B\$ 的可达速率表达式唯一确定,而 \$M_C\$ 的可达速率表达式与 \$\sum I_C, \sum I_B\$ 的大小有关。下文将分别讨论 \$\sum I_C \geq \sum I_B\$ 和 \$\sum I_C < \sum I_B\$ 两种场景。

3.1 \$\sum I_C \geq \sum I_B\$ 场景下模式选择方案

首先分析 \$M_A\$ 与 \$M_C\$ 间的选择方案,根据式(5)和式(11),令 \$Q = R^{M_C}(g) - R^{M_A}(g)\$,化简可得

$$Q = 1 + \frac{P_{DT}g}{\sum I_C + N_0} - \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(\sum V_C + N_0)} \right) \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(\sum V_B + N_0)} \right) \quad (13)$$

当 \$Q > 0\$ 时,对式(13)进行变量分离,得到距离参数

$$d_{DR} > Y_{M_A M_C} \quad (14)$$

式中 \$Y_{M_A M_C}\$ 为 \$M_A\$ 与 \$M_C\$ 的切换点,可表示为

$$Y_{M_A M_C} = \left(\frac{bc}{P_{DT}(\sum I_C + N_0)} - \frac{b+c}{P_{DT}} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (15)$$

式中: \$b = 2^\alpha(\sum V_B + N_0), c = 2^\alpha(\sum V_C + N_0)\$。

由式(14)不难发现:以距离参数 \$d_{DR}\$ 为变量时, \$M_A\$ 与 \$M_C\$ 的可达速率存在交点。当距离参数小于 \$Y_{M_A M_C}\$ 时, \$M_A\$ 性能较好,反之 \$M_C\$ 更佳。根据以上结论,可得到 \$M_A\$ 与 \$M_C\$ 间的模式选择方案为

$$\begin{cases} d_{DR} < Y_{M_A M_C} & M_A \\ d_{DR} \geq Y_{M_A M_C} & M_C \end{cases} \quad (16)$$

类似地,可以分析求得 \$M_A\$ 与 \$M_B\$ 间的模式选择方案,根据式(5)和式(7),令 \$F = R^{M_B}(g) - R^{M_A}(g)\$,进一步化简得

$$F = \left(1 + \frac{P_{DT}g^2G^2}{G^2g(\sum I_C + N_0) + P_{BT}k^{-\alpha}g} \right)^2 - \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(\sum V_C + N_0)} \right) \left(1 + \frac{P_{DT}g}{2^\alpha(\sum V_B + N_0)} \right) \quad (17)$$

式中 \$k = d_{B_2}/d_{DR}\$。当 \$F > 0\$ 时,有

$$d_{DR} < Y_{M_A M_B} \quad (18)$$

式中, $Y_{M_A M_B}$ 为 M_A 与 M_B 的切换点, 其表达式为

$$Y_{M_A M_B} = \left(\frac{-2G^2 abc + a^2(b+c)}{P_{DT}(G^4 bc - a^2)} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (19)$$

式中: $a = G^2(\sum I_C + N_0) + P_{BT}k^{-\alpha}$ 。基于此, 可得到 M_A 和 M_B 间的模式选择方案为

$$\begin{cases} d_{DR} < Y_{M_A M_B} & M_B \\ d_{DR} \geq Y_{M_A M_B} & M_A \end{cases} \quad (20)$$

令

$$H = \left(1 + \frac{P_{DT}g^2G^2}{G^2g(\sum I_C + N_0) + P_{BT}k^{-\alpha}g} \right)^2 - \left(1 + \frac{P_{DT}g}{\sum I_C + N_0} \right) \quad (21)$$

当 $H > 0$ 时, 有

$$d_{DR} < Y_{M_B M_C} \quad (22)$$

式中 $Y_{M_B M_C}$ 为 M_B 与 M_C 的切换点, 可表示为

$$Y_{M_B M_C} = \left(\frac{a - 2G^2a(\sum I_C + N_0)}{P_{DT}G^4(\sum I_C + N_0)} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (23)$$

由此可得, M_B 和 M_C 间的选择方案为

$$\begin{cases} d_{DR} < Y_{M_B M_C} & M_B \\ d_{DR} \geq Y_{M_B M_C} & M_C \end{cases} \quad (24)$$

综合式(16, 20, 24), 可以得到 $\sum I_C \geq \sum I_B$ 的场景下 3 种传输模式间的选择方案

$$\begin{cases} d_{DR} < Y_{M_A M_B} & M_B \\ Y_{M_A M_B} \leq d_{DR} < Y_{M_A M_C} & M_A \\ d_{DR} \geq Y_{M_A M_C} & M_C \end{cases} \quad (25)$$

式(25)为蜂窝用户干扰较强的场景下的模式选择方案, 由式(25)可以看出, 当距离参数 d_{DR} 小于某特定值($Y_{M_A M_B}$)时, 应选用基于 AF 中继的 D2D 通信模式; 当距离参数 d_{DR} 大于某特定值($Y_{M_A M_C}$)时, 基于 DF 中继的 D2D 通信模式优于其他两种模式; 当距离参数 d_{DR} 介于两个特定值($Y_{M_A M_B}$ 和 $Y_{M_A M_C}$)之间时, 传统 D2D 通信模式为最优选择。特别地, $Y_{M_A M_B}$, $Y_{M_A M_C}$ 和 $Y_{M_B M_C}$ 均为仅含有基本数学运算的闭合表达式, 对于蜂窝用户干扰较弱($\sum I_C < \sum I_B$)的场景, 下文将进行详细分析。

3.2 $\sum I_C < \sum I_B$ 场景下模式选择方案

利用 3.1 节中的分析方法, 可以得到 M_A 与 M_C 的选择方案为

$$\begin{cases} d_{DR} < Y'_{M_A M_C} & M_A \\ d_{DR} \geq Y'_{M_A M_C} & M_C \end{cases} \quad (26)$$

式中 $Y'_{M_A M_C}$ 为 M_A 和 M_C 的切换点, 满足

$$Y'_{M_A M_C} = \left(\frac{bc}{P_{DT}(\sum I_B + N_0)} - \frac{b+c}{P_{DT}} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (27)$$

由式(26)可以看出: 当 $d_{DR} < Y'_{M_A M_C}$ 时, M_A 的优势较为显著; 当 $d_{DR} \geq Y'_{M_A M_C}$ 时, 选择 M_C 更为合

适。由于 $Y_{M_A M_B}$ 和 $Y_{M_B M_C}$ 均为与 $\sum I_C$ 和 $\sum I_B$ 大小无关的闭合表达式, M_A 与 M_B 的选择方案、 M_B 与 M_C 的选择方案与3.1节中相同, 此处不再赘述。

综合式(20, 24, 26), 在弱蜂窝用户干扰场景下, 基于中继的D2D通信传输模式选择方案为

$$\begin{cases} d_{DR} < Y_{M_A M_B} & M_B \\ Y_{M_A M_B} \leq d_{DR} < Y'_{M_A M_C} & M_A \\ d_{DR} \geq Y'_{M_A M_C} & M_C \end{cases} \quad (28)$$

3.3 通信模式选择方案

综合式(25, 28), 可得出3种D2D通信模式间选择算法流程图, 如图2所示。

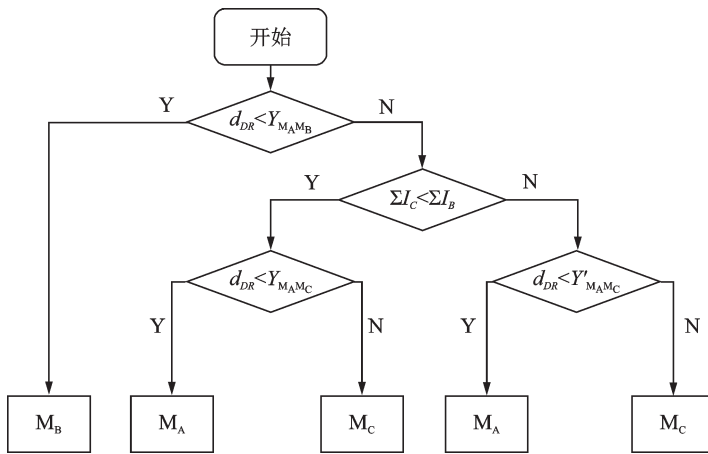


图2 系统模式选择流程图

Fig.2 Flow diagram for mode selection scheme

从图2可以看出, 系统通过比较用户间距离与各模式切换点的大小, 动态选择D2D用户间的通信传输模式, 而模式切换点只需通过简单的闭合表达式计算即可得到。特别地, 本文中考虑的D2D用户分布在不同的小区, 当D2D用户分布在同一小区时, 只需更改干扰项, 即 $\sum I_C$ 与 $\sum I_B$ 的表达式即可。

4 系统仿真

为验证本文所提出的模式选择方案的有效性, 本文随机选取若干组不同的系统参数进行了仿真验证, 考虑城市通信场景, 部分参数设置如表1所示。

图3针对 $\sum I_C < \sum I_B$ 的场景, 描绘了各模式的可达速率随D2D用户间距变化的曲线图, 以及采用模式选择方案后可达速率的曲线。在图3(a)中, 设D2D用户发送信噪比 $SNR=20$ dB, 蜂窝用户到D2D用户的距离为5, 考虑用户位于小区边缘的场景, 设用户到基站的距离为10。在图3(b)中, 设 $SNR=10$ dB, 可以直观地看出, 随着D2D用户与中继用户间距离的增大, 3种模式下系统可达速率均呈负指数趋势下降。由于下降快慢有

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

归一化参考距离	$d_0 = 1$
归一化噪声功率	N_0
蜂窝用户发射功率	$P_{CT} = 10P_{DT}$
基站发射功率	$P_{BT} = 100P_{CT}$
路径损耗系数	$\alpha = 4$

差异,3条曲线存在交点。从图 3(a)中可以看出:当D2D用户间距离在 0~4 范围内时,系统选择 AF 模式进行通信;当距离约在 4~5.5 范围内时,系统选择传统 D2D 模式;当距离大于 5.5 时,DF 模式更优。类似的结果也可在图 3(b)中观察得到。通过图 3 可以看出,采用本文提出的模式选择方案后,系统可达速率能够一直保持最优。

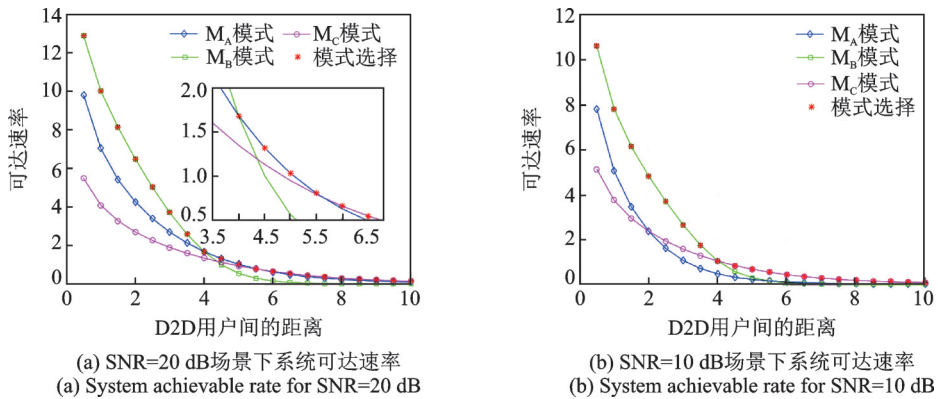


图 3 $\sum I_C < \sum I_B$ 场景中 3 种传输模式以及采用模式选择方案下系统可达速率

Fig.3 Achievable rate of three modes and mode selection results for the case $\sum I_C < \sum I_B$

对于强干扰场景,在图 4(a)中,假设 D2D 用户到各自基站的距离为 8,设蜂窝用户距 D2D 用户较近,即 $d_{CD} = 3$ 。在图 4(b)中,设 D2D 用户到基站的距离为 12,其余参数设置与图 4(a)相同。分析图像可知,当 D2D 用户间距离小于 3.5 时,AF 模式的可达速率最大;当距离在 3.5~4.5 范围内时,传统 D2D 模式的通信质量更高;当距离大于 4.5 时,DF 模式更优。类似地也可得到图 4(b)的模式选择结果。

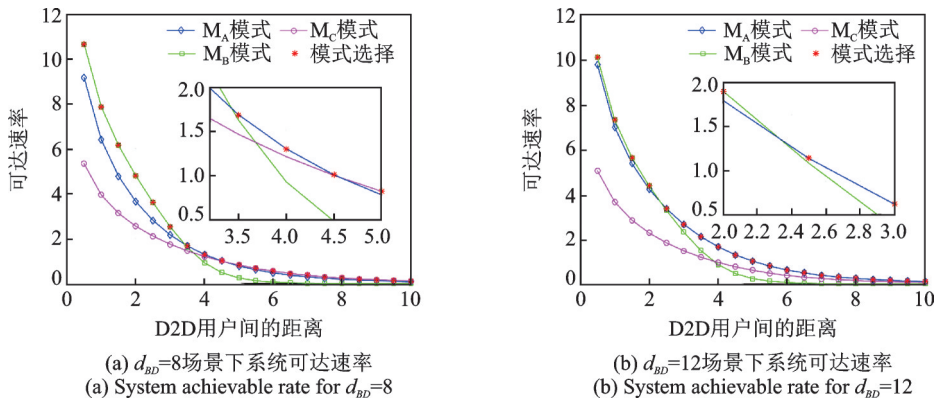


图 4 $\sum I_C \geq \sum I_B$ 场景中 3 种传输模式以及采用模式选择方案下系统可达速率

Fig.4 Achievable rate of three modes and mode selection results for the case $\sum I_C \geq \sum I_B$

综合以上仿真结果不难发现,采用了模式选择方案后,系统在 3 种通信模式间进行动态切换,从而使传输速率始终维持在最优。

5 结束语

本文主要研究了 3 种 D2D 传输模式间的模式选择方案,包括基于 AF 中继的 D2D 通信模式和基于 DF 中继的 D2D 通信模式以及传统 D2D 模式。本文分析了 3 种模式下的干扰形态,写出各个模式下的

接收 SINR,求得相应的可达速率,并据此提出了通信系统的模式选择方案的闭合表达式。研究表明,当两 D2D 用户通信距离较近时采用 AF 中继的 D2D 通信模式,通信距离较远时采用 DF 中继辅助下的 D2D 通信模式更优,而当通信距离适中时则采用传统 D2D 通信模式。仿真结果显示,通过动态选择 3 种通信模式,系统的可达速率得到了显著的提升。

参考文献:

- [1] Huo Yiming, Dong Xiaodai, Xu Wei, et al. Cellular and WiFi co-design for 5G user equipment[C]// IEEE 5G World Forum (5GWF). Silicon Valley, CA, USA:IEEE, 2018: 1-6.
- [2] Chen Yajun, Ji Xisheng, Huang Kaizhi, et al. Opportunistic access control for enhancing security in D2D-enabled cellular networks[J]. Science China(Information Sciences), 2018, 61(4): 187-198.
- [3] 徐操喜,杨小英,甘金海,等. D2D 通信技术及应用场景分析[J]. 无线互联科技, 2018, 15(11): 11-13.
Xu Caoxi, Yang Xiaoying, Gan Jinhai, et al. Analysis on the D2D communication technology and application scenarios[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(11): 11-13.
- [4] Patocskai T, Fazekas P. Performance of mobile relay assisted networks: Energy-efficiency and cell capacity of multihop cellular networks[C]// International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Primosten, Croatia:[s.n.], 2013: 1-5.
- [5] Kumar D P, Babu M S, Prasad M S G. Suboptimal comparison of AF and DF relaying for fixed target error probability[C]// International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). Coimbatore, India:[s.n.], 2016: 1-6.
- [6] Ali A, Ejaz A, Jabbar M, et al. Performance analysis of AF, DF and DtF relaying techniques for enhanced cooperative communication[C]// International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH). Dublin:[s.n.], 2016: 594-599.
- [7] Biswas S, Chandra A. DF versus AF: Energy consumption comparison for IEEE 802.15.4 networks[C]// International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS). Bangalore:[s.n.], 2014: 1-7.
- [8] Zhou Q, Zang G Z, Gao Y Y, et al. Opportunistic relay selection for secure communication in AF multi-antenna relaying networks[C]// IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China:IEEE, 2017: 2573-2577.
- [9] 李方健. D2D 通信系统中的最优中继选择及功率分配策略研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2014, 26(5): 605-610.
Li Fangjian. Optimal relay selection and power allocation method for device-to-device communication systems[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2014, 26(5): 605-610.
- [10] Shamganth K, Martin J N S, et al. A survey on relay selection in cooperative device-to-device (D2D) communication for 5G cellular networks[C]// International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). Chennai, India:[s.n.], 2017: 42-46.
- [11] Ma B, Zhang H, Zhang Z. Joint power allocation and mode selection for D2D communications with imperfect CSI[J]. China Communications, 2015, 12(7): 73-81.
- [12] 曹型兵,王伟超. 基于资源分配和功率控制的 D2D 中继选择[J]. 电讯技术, 2017, 57(12): 1433-1439.
Cao Xingbing, Wang Weichao. D2D relay selection based on resource allocation and power control[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(12): 1433-1439.
- [13] Kim J, Kim S, Bang J, et al. Adaptive mode selection in D2D communications considering the bursty traffic model[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(6): 712-715.
- [14] Janis P, Koivunen V, Ribeiro C B, et al. Interference-avoiding MIMO schemes for device-to-device radio underlying cellular networks[C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo, Japan:IEEE, 2009: 2385-2389.
- [15] Uyoata U, Mqhele D. Joint power allocation and relay selection for relay assisted D2D communication with channel uncertainties [C]// IEEE EUROCON International Conference on Smart Technologies. Ohrid, Macedonia:IEEE, 2017: 486-490.

- [16] 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.
- [17] 黄雅, 邵世祥, 孙君. 基于相对距离的 D2D 通信模式选择方案[J]. *微型机与应用*, 2015, 34(17): 52-56.
Huang Ya, Shao Shixiang, Sun Jun. A relative distance-based mode selection scheme for D2D communication[J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2015, 34(17): 52-56.
- [18] Hoang T D. Joint mode selection and resource allocation for relay-based D2D communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(2): 398-401.

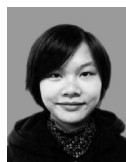
作者简介:



王玉玺(1978-),男,副教授,研究方向:物联网理论与关键技术、计算机科学与技术, E-mail: wyx@jssnu.edu.cn。



刘娅璇(1998-),女,本科,研究方向:物联网工程。



徐嘉懿(1998-),女,本科,研究方向:物联网工程。



张楠(1998-),女,本科,研究方向:物联网工程。



倪艺洋(1986-),女,博士,讲师,研究方向:5G移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术。



朱洪波(1956-),男,博士,教授,研究方向:移动通信与宽带无线技术,物联网理论与关键技术。

(编辑:刘彦东)