

一种联合 D2D 资源分配的中继选择算法的研究*

王伟超, 尹礼欣, 龚胜丽

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 由于蜂窝边缘用户受信道衰落的影响, 用户 QoS 较差。为提高蜂窝网络中边缘用户的 QoS, 可在蜂窝网络中引入 D2D 辅助中继技术, 然而由于 D2D 链路复用蜂窝资源会与蜂窝链路之间产生同频干扰。为了降低这种干扰, 提出了一种联合资源分配的中继选择算法, 该算法首先使用一种资源分配策略, 使得 D2D 链路对蜂窝链路产生的干扰最小, 然后结合资源分配结果提出了一个中继选择方案, 该方案不仅考虑了 D2D 链路和回程链路的信道质量, 而且还同时考虑到了对蜂窝链路的干扰问题。通过仿真验证, 所提出的算法不仅能有效提升边缘用户吞吐量, 同时保证了中心用户的 QoS。

关键词: D2D; 资源分配; 中继选择; 吞吐量

中图分类号: TP929.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1475-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.042

Joint D2D resources allocation and relay selection algorithm for cell edge users in LTE

Wang Weichao, Yin Lixin, Gong Shengli

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts & Communications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Device-to-device (D2D) communication underlying cellular networks could use direct communication between devices as a relay strategy for coverage extension. This paper considered such a D2D-relaying approach in a scenario where there were multiple candidate devices to be selected as relays. It could cause interference between D2D links and cellular links because of resource reuse. In order to reduce the impact of interference, this paper proposed an algorithm of jointing D2D resources allocation and relay selection for the cell edge users in LTE. Adopting a resource allocation scheme could get minimum interference between D2D links and cellular links. Then this paper proposed a simplified relay selection based on the resource allocation scheme. This scheme not only considered the channel quality of the D2D links and the backhaul links, but also taken into account the interference of users. Using this scheme in a system simulation, this paper demonstrated the algorithm increases the throughput of cell-edge users significantly and guarantees QoS of central users.

Key words: device-to-device(D2D); resource allocation; relay selection; system throughput

0 引言

移动通信设备数量的迅速增长给传统的蜂窝网络带来了巨大的挑战。而且在未来的 5G 网络中, 维持一致的用户体验也是一个最具有挑战性的难题^[1]。若要克服这一难题, 用户体验应与用户在小区中的位置无关。从这一角度来看, 与 4G 技术相比, 5G 中最重要的改进应该在小区边缘用户的吞吐量问题上。为了实现这样的改进, 就需要引入新的通信和网络技术。虽然分布式天线系统和超密集网络技术可以小区边缘用户的通信质量, 但是由于网络基础设施变得更加密集, 部署和维护成本也会加大。因此, 在未来的 5G 网络中, 本文可以通过使用 D2D 辅助中继技术来改善和提高蜂窝小区系统容量和覆盖范围^[1]。其基本想法就是将蜂窝小区中通信质量较好的用户认定为中心用户, 而用户通信质量较差的用户为边缘用户。蜂窝小区中信道质量较好, 并且未进行通信的用户可视为

空闲用户来为边缘用户提供中继服务。边缘用户与中继之间采用 D2D 方式进行通信, 中继与基站之间采用传统蜂窝模式进行通信^[2]。

近些年来, 协作通信的中继选择问题已被进行了广泛的研究^[3-5], 然而由于终端的移动性和 D2D 复用蜂窝资源等问题, D2D 辅助中继问题不同于传统的中继选择问题。文献[6]提出了一种基于吞吐量预测的整体优化中继选择算法, 该算法为 D2D 链路分配了和中心用户相正交的频谱资源, 造成了频谱资源的浪费。文献[7]提出了一种启发式算法来解决中继选择问题中的 MILP 问题, 虽然相对于直接解 MILP 问题来说, 其运算时间较短, 但是由于事先未划定被复用资源的中心用户范围, 需要对所有的中心用户进行遍历, 才能找到最佳的中心用户来复用其资源。

针对以上问题, 本文提出了一种联合资源分配的中继选择算法。该算法的目的是在边缘用户的吞吐量最大化的基础上, 减小 D2D 链路对蜂窝链路的干扰。

收稿日期: 2017-01-17; **修回日期:** 2017-03-07 **基金项目:** 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1299); 重庆市科委重点实验室专项经费资助项目(cstc2013yykfa40010)

作者简介: 王伟超(1992-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信(wangweichao2015@163.com); 尹礼欣(1993-), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信; 龚胜丽(1990-), 女, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信。

1 系统模型

蜂窝小区按照通信距离远近被分为中心区域与边缘区域,如图1所示。其中:中心区域内有 M 个用户与基站(BS)直接通信,称为中心用户(CUE);边缘区域内 N 个用户通过中心区域空闲用户与基站进行通信,称为边缘用户(SUE)。

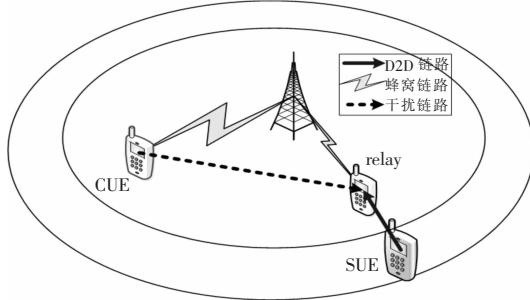


图1 D2D辅助中继通信系统模型

假设用户的传输功率可平均分配到用户所使用各个资源块RBs上,边缘用户SUE和中继的传输功率由BS进行控制,来确保接收端所接收到的功率满足要求。

用户的发送功率可定义为

$$P_{tx} = \min \{ P_{\max}, N_{rb} P_0 / g_j \} \quad (1)$$

其中: P_{\max} 是用户(UE)的最大发射功率; P_0 是每个RB在BS处的门限接收功率; N_{rb} 是分配的资源块数目。

在实际情况下,一个用户UE的最大传输功率为 P_{\max} ,当UE与BS之间的信道质量太差时,为保证用户的吞吐量,即保持RBs数目一定的情况下,即使UE使用最大的传输功率也不能保证每个RB满足在BS处的门限功率值。

因此,UE可使用的最大RBs的数目为

$$N_{\max} = \lceil \frac{P_{\max}}{P_0 / g_j} \rceil \quad (2)$$

根据文献[8], P_0 设置为 -90 dBm。由于RBs和 P_{\max} 的限制,若这时的边缘用户SUE直接使用一跳链路进行传输时,不能保证边缘用户的QoS,所以SUE可使用空闲的中心用户作为中继进行传输,使边缘用户SUE的吞吐量得到提高。

$$N_{S,R} = \min \{ \lceil \frac{P_{\max}}{P_0 / g} \rceil, N_R \} \quad (3)$$

边缘用户SUE与其中继relay之间的D2D链路只复用单个中心用户CUE的所有资源块,所复用的资源块个数 $N_{S,R}$ 应小于等于 N_R 。

本文考虑复用蜂窝上行传输链路资源的单小区场景,假设小区内 M 个正在通信的中心用户(CUE),集合为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_M\}$; N 个边缘用户(SUE)需要与基站(BS)进行通信,集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_N\}$; 第 j 个边缘用户有 L 个候选的中继,集合为 $C_{j,RUE} = \{R_{j,1}, R_{j,2}, \dots, R_{j,k}, \dots, R_{j,L}\}$ 。假设基站已知各个用户设备相关的位置信息和信道增益。若第 j 个边缘用户 S_j 两跳链路中的D2D链路部分D2D_j复用第 i 个中心用户 C_i 的上行链路资源,可将第 j 个边缘用户 S_j 的D2D链路部分看成一个单纯的D2D_j链路资源分配的问题。

假设D2D_j只能复用中心用户 C_i 的频谱资源,对其进行干扰分析,如图1所示, C_i 向BS发射信号,信道增益为 $g_{i,B}$ 。第 j 个边缘用户的D2D链路D2D_j的发射端D2D_{j,tx}和接收端

D2D_{j,rx}之间的信道增益为 g_j 。D2D_{j,rx}会受到 C_i 的干扰, C_i 与D2D_{j,rx}之间的信道增益为 $h_{i,j}$ 。基站端接收到 C_i 的有用信号时,会受到D2D_{j,tx}的干扰, D2D_{j,tx}与基站之间的信道增益为 $h_{j,B}$ 。高斯白噪声为 σ_N^2 。

根据文献[9,10],为保证所有用户的QoS,D2D链路、中继与基站之间的回程链路以及正在进行通信的蜂窝链路的信干噪比SINR需满足以下条件:

$$\gamma_{j,i}^d = \frac{P_j^d \times g_j}{\alpha_{i,j} \times P_i^c \times h_{i,j} + \sigma_{i,j}^2} \geq \gamma_{j,i}^{d,\min} \quad (4)$$

$$\gamma_i^c = \frac{\alpha_{i,j} \times P_i^c \times g_{i,B}}{P_j^d \times h_{j,B} + \sigma_{i,j}^2} \geq \gamma_i^{c,\min} \quad (5)$$

$$\gamma_{i-\text{non}}^c = \frac{(1 - \alpha_{i,j}) \times P_i^c \times g_{i,B}}{\sigma_{i-\text{non}}^2} \geq \gamma_{i,\min}^c \quad (6)$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{N_{S,R}}{N_R} \quad (7)$$

其中: P_j^d 是D2D_{j,tx}发射功率; P_i^c 是 C_i 的发射功率; $\alpha_{i,j}$ 是 C_i 被D2D_j复用的资源块占 C_i 资源块的比例。 $\alpha_{i,j}$ 的设定由式(2)求得。 $\gamma_{j,i}^d$ 是D2D_{j,rx}端的SINR; γ_i^c 是 C_i 受到D2D_{j,tx}的干扰在基站处的SINR; $\gamma_{i-\text{non}}^c$ 是 C_i 在未被D2D_j复用的资源块上的SINR; $\gamma_{j,\min}^d$ 是D2D_j的最小SINR; $\gamma_{i,\min}^c$ 是 C_i 在基站处的最小SINR; $\sigma_{i,j}^2$ 是被D2D_j复用的资源块上的高斯白噪声功率, $\sigma_{i-\text{non}}^2$ 是 C_i 在未被D2D_j复用的资源块上的高斯白噪声。式(4)表示D2D_j的SINR必须大于D2D_j的最小SINR;式(5)表示 C_i 受到D2D_j干扰后的SINR必须大于 C_i 在基站处的最小SINR;式(6)表示 C_i 在未被D2D_j复用的资源块上的SINR需要满足 C_i 的最小SINR;式(7)表示D2D_j复用的资源块占 C_i 资源块的比例。

D2D链路和回程链路的信道容量计算式如下:

$$C_j^{\text{D2D}} = BN_{R_{j,k}} \lg(1 + \gamma_{R_{j,k}}^d); R_{j,k} \in C_{j,RUE} \quad (8)$$

$$C_j^{\text{bh}} = BN_{R_{j,k}} \lg(1 + \gamma_{R_{j,k},B}); R_{j,k} \in C_{j,RUE} \quad (9)$$

其中: C_j^{D2D} 表示第一跳D2D链路的信道容量; C_j^{bh} 表示第二跳中继与基站之间的信道容量; B 表示一个资源块RB所占的带宽; $\gamma_{R_{j,k}}^d$ 表示中继端的SINR; $\gamma_{R_{j,k},B}$ 表示基站端的SINR。由于中继受到半双工的限制,中继不能同时收发信息,为了避免“瓶颈问题”,令 β 为在一个单位时隙中分配给回程链路的时隙比例, $(1 - \beta)C_j^{\text{D2D}} = \beta C_j^{\text{bh}}$ 。

为了使边缘用户获得最大吞吐量和满足中心用户的QoS需求。边缘用户 S_j 的中继选择和资源分配问题可以建模如下数学问题。

目标函数为

$$\max \sum_{k \in C_{j,RUE}} x_k R_{\text{relay},j,k} \quad (10a)$$

约束条件为

$$R_{\text{relay},j,k} = \beta C_j^{\text{bh}} \quad (10b)$$

$$0 < \beta < 1 \quad (10c)$$

$$(1 - \beta)C_j^{\text{D2D}} = \beta C_j^{\text{bh}} \quad (10d)$$

$$(1 - \beta)N_{R_{j,k},B} \leq N_R \quad (10e)$$

$$\beta N_{R_{j,k}} \leq N_R \quad (10f)$$

$$\gamma_{R_{j,k},B} \geq \gamma_{\min}^B \quad (10g)$$

$$\gamma_{c,B} \geq \gamma_{\min}^B \quad (10h)$$

$$\gamma_{R_{j,k}}^d \geq \gamma_{\min}^d \quad (10i)$$

$$\sum_{k \in C_{j,RUC}} x_k = 1, x_k \in \{0, 1\} \quad (10j)$$

因瓶颈问题,可令 β 为在一个单位时隙中分配给回程链路的时隙比例, β 的取值范围为 $0 < \beta < 1$, 所以链路第一跳和第二跳的容量关系可表示为 $(1 - \beta) C_j^{D2D} = \beta C_j^{bh}$, 令 $R_{relay,j,k}$ 表示整个中继链路的吞吐量, 即 $R_{relay,j,k} = \beta C_j^{bh}$ 。 $N_{R_{j,k},B}$ 表示系统给中继与基站之间链路分配的最大资源块的个数, $N_{R_{i,k}}$ 表示系统分配给边缘用户与中继之间链路的最大资源块个数。因考虑到系统内的公平性问题和两跳链路之间的瓶颈效应, 分配给第一跳 (D2D 链路) 和第二跳链路 (中继与基站之间的回程链路) 的资源块个数均不能大于系统内分配所有用户的资源块的平均值, 即 $(1 - \beta) N_{R_{j,k},B} \leq N_R, \beta N_{R_{j,k},B} \leq N_R$ 。为使式 (10a) 最大化, $N_{R_{i,k},B}, N_{R_{i,k}}$ 应最大化的同时, 还应保证受到干扰的中心用户的 QoS, 满足接收端的 SINR 门限值, 即约束条件为式 (10g) ~ (10j), γ_{min}^B 和 γ_{min}^d 分别表示基站端和 D2D 接收端的 SINR 门限值, $\gamma_{R_{j,k},B}, \gamma_{e,B}$ 和 $\gamma_{R_{j,k}}^d$ 分别代表中继到基站的 SINR, 蜂窝用户到基站的 SINR 和 D2D 接收端的 SINR。 $x_k = 1$ 表示使用第 k 个候选节点作为中继; $x_k = 0$ 表示不使用第 k 个候选节点作为中继。

2 联合 D2D 资源分配的中继选择算法

相对于其他的中继选择方法, 本文提出的联合 D2D 资源分配的中继选择算法有两个优势: a) 能保证边缘用户吞吐量最大化; b) 能保证被复用资源的中心用户受到的干扰最小, 保证了中心用户的 QoS。

本文提出的算法分两步: a) 确定 D2D 通信范围内的每个候选中继 $R_{j,k}$ 与边缘用户 S_j 形成的 D2D 链路的潜在复用用户集合; b) 通过本文提出的判断条件得到中继选择和资源分配结果。

2.1 确定 D2D 链路的潜在复用用户集合

首先通过式 (11) ~ (14) 中的功率约束条件确定 D2D_j 链路的潜在复用用户集合, 引用文献[11]中的线性规划方法, 在满足中心用户和 D2D_j 链路的 QoS 的情况下, 确定 D2D_j 链路的潜在复用集合 CU。

$$\gamma_{j,min}^d \times P_i^c \times h_{i,j} + \sigma_N^2 \times \gamma_{j,min}^d - P_j^d \times g_j \leq 0 \quad (11)$$

$$\gamma_{i,min}^c \times P_j^d \times h_{j,B} + \sigma_{i,j}^2 \times \gamma_{i,min}^c - P_i^c \times g_{j,B} \leq 0 \quad (12)$$

$$0 \leq P_i^c \leq P_{max}^c \quad (13)$$

$$0 \leq P_j^d \leq P_{max}^d \quad (14)$$

其中: $\gamma_{j,min}^d, \gamma_{i,min}^c$ 分别代表 D2D 链路 j 和蜂窝用户 i 的 SINR 门限值; P_i^c, P_j^d 分别代表蜂窝用户和 D2D 发射端的发射功率; P_{max}^c, P_{max}^d 分别代表蜂窝用户和 D2D 发射端的最大发射功率; $g_j, h_{j,B}$ 分别代表边缘用户 j 与中继之间和中继与基站之间的信道状态; $h_{i,j}$ 代表蜂窝用户 i 到 D2D 链路 j 的信道状态; $\sigma_{i,j}^2, \sigma_N^2$ 代表产生的高斯白噪声。

若要上式 P_i^c, P_j^d 有解, 则需要满足以下条件:

$$\frac{\gamma_{i,min}^c \times h_{j,B}}{g_{j,B}} \leq \frac{g_j}{\gamma_{j,min}^d \times h_{i,j}} \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_N^2 \times \gamma_{j,min}^d}{g_j} \leq \frac{(\gamma_{j,min}^d \times \gamma_{i,min}^c \times h_{i,j} + g_{i,B} \times \gamma_{j,min}^d) \times \sigma_N^2}{g_j \times g_{i,B} - \gamma_{j,min}^d \times \gamma_{i,min}^c \times h_{i,j} \times h_{j,B}} \leq P_{max}^d \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_N^2 \times \gamma_{i,min}^c}{g_{j,B}} \leq \frac{(\gamma_{j,min}^d \times \gamma_{i,min}^c \times h_{i,B} + g_j \times \gamma_{i,min}^c) \times \sigma_N^2}{g_j \times g_{i,B} - \gamma_{j,min}^d \times \gamma_{i,min}^c \times h_{i,j} \times h_{j,B}} \leq P_{max}^c \quad (17)$$

找出所有满足上述条件的中心用户 C_i 作为 D2D_j 的潜在复用集合 CU。

2.2 确定中继选择和资源分配

为保证所提出的中继选择算法在检测候选的中继使用其潜在复用的资源时, 能否帮助边缘用户完成与基站的通信, 并满足吞吐量最大的要求, 为此本文定义一个参数 φ_{r_j,m_i} 来判定选择中继和复用的蜂窝资源块, 综合考虑各个信道质量和发射功率对中继选择的影响, 经多次仿真验证, φ_{r_j,m_i} 为:

$$\varphi_{R_{j,k}, C_i} = \frac{P_{max}^d \times g_j + P_{max}^c \times g_{i,B}}{P_{max}^c \times g_{i,j} + P_{max}^d \times h_{j,B}}; R_{j,k} \in C_{j,RUC}, C_i \in CU \quad (18)$$

其中: $R_{j,k}$ 表示边缘用户 j 的第 k 个候选中继节点; C_i 代表蜂窝用户 i 。

在实际的蜂窝网络中, 新节点的加入及旧节点的退出以及节点的移动性等问题也是本文必须考虑的问题, 因此本文在算法中加入了备选中继的概念, 用来解决上述问题, 具体算法描述如下:

a) 初始化边缘用户 S_j 的候选的中继个数 $l = L$, 处于通信状态的中心用户数 $m = M$;

b) 将 S_j 与每个候选中继之间都视为一个 D2D 链路, 确定每个 D2D 链路的潜在复用用户集合 CU;

c) 计算出每个候选中继节点的 $\varphi_{R_{j,k}, C_i}$ 的值, 存入矩阵 φ 中;

d) 在矩阵 φ 中, 找到最大值的 $\varphi_{R_{j,k}, C_i}$ 和次优值 $\varphi_{R_{j-1,k}, C_{i'}}$; 通过最大值 $\varphi_{R_{j,k}, C_i}$ 得到对应最优的资源分配和中继选择结果, 而通过次优值 $\varphi_{R_{j-1,k}, C_{i'}}$ 得到对应次优的资源分配和中继选择结果, 若 $C_{i'}$ 为其他边缘用户的最优选择时, 则继续选择其他满足 SINR 门限值的次优值的中继为备用中继节点, 并移除最优中继对应的被复用资源的中心用户 $C_i, C_{i'}$ 不参与下一个边缘用户的资源分配。

e) 若有不同的边缘用户选择了相同的中继节点, 进行 K-M 算法, 与候选中继节点进行最优匹配。得到所有边缘用户的中继选择和资源分配结果。

3 算法性能仿真

由于 D2D 辅助中继通信是为了保证 LTE 或 LTE-A 系统中的用户的 QoS 而提出的一种通信方式, 所以本文选取的是 LTE 单小区系统模型作为仿真场景, 同时本文以调和平均数中继选择算法和随机算法作为参考算法, 通过与本文算法的比较, 可清楚辨识出本文所提算法的性能。仿真参数如表 1 所示。

如图 2 所示, 当边缘用户搜索中继的半径一定时, 候选中继个数对边缘用户的频谱效率的影响; 图 3 表示的是在候选中继个数一定时, 随着边缘用户搜索中继半径的增加对算法的影响。由图 2, 3 可知, 本文所提出的算法明显优于使用调和平均数的中继选择算法和随机算法, 而且在调和平均数中继选择算法中使用本文所提出的资源分配策略之后, 本文所提出的算法也能保持较好的性能。

表1 仿真参数

参数	取值
小区半径	500 m
中心频率 f_c	2 GHz
中心用户最大发射功率	23 dBm
D2D 最大发射功率	10 dBm
中心用户数	30
边缘用户数	5
D2D 通信半径	50 ~ 100 m
候选中继个数	5 ~ 30
白噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
D2D 链路损耗模型	$16.9 \times \log_{10}(d[\text{m}]) + 46.8 + 20 \times \log_{10}(f_c[\text{GHz}]/5.0)$
蜂窝对 D2D 干扰链路损耗模型	$40 \times \log_{10}(d[\text{km}]) + 30 \times \log_{10}(f_c[\text{MHz}]) + 49$
蜂窝链路损耗模型	$128.1 + 37.6 \times \log_{10}(d[\text{km}])$

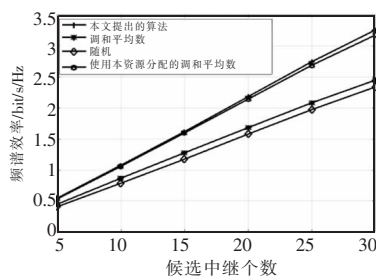


图2 边缘用户候选中继变化时, 使用不同算法的边缘用户频谱效率的对比

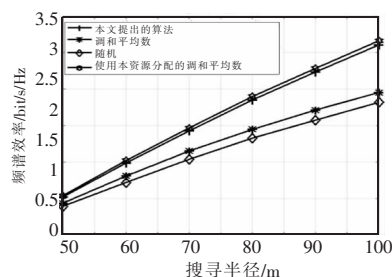


图3 边缘用户搜索半径变化时, 使用不同算法的边缘用户频谱效率的对比

本文定义对中心用户的影响为中心用户未受到 D2D 链路干扰时的频谱效率与受到 D2D 链路干扰时的频谱效率之差, 因此对中心用户的影响越小, 代表算法的性能越好, 即越能保护被复用资源的中心用户的公平性。如图 4、5 所示, 本文所提出的算法明显由于调和平均数算法和使用本资源分配策略的调和平均数算法, 这是因为调和平均数算法只考虑了边缘用户与中继之间的信道质量和回程链路的信道质量关系, 并未考虑对被复用资源的中心用户造成的干扰问题, 由此可见, 本文提出的算法不仅保证和边缘用户的频谱效率的同时, 也保证了中心用户的 QoS。

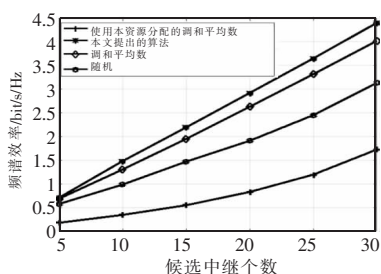


图4 边缘用户候选中继个数变化时, 不同算法对被复用资源的中心用户频谱效率影响的对比

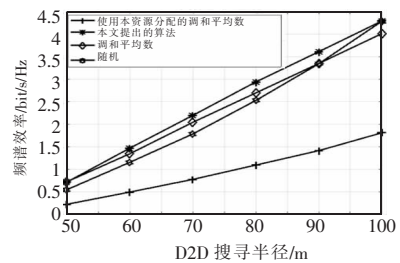


图5 边缘用户搜索半径变化时, 使用不同算法的对被复用资源的中心用户频谱效率的影响对比

4 结束语

在本文中研究了 LTE 网络下的 D2D 辅助中继通信技术, 在提高边缘用户吞吐量的同时, 优化了 D2D 链路对中心用户的同频干扰问题, 进而保证了中心用户的 QoS。在实际的蜂窝网络中, 新节点的加入及旧节点的退出以及节点的移动性等问题, 本文只是初步解决了这些问题, 在现实中, 这些问题会更加复杂, 而且本文中只考虑了 D2D 链路复用蜂窝上行资源的情况。在接下来的研究中, 会进一步研究新节点的加入及旧节点的退出以及节点的移动性和同时考虑复用蜂窝上下行资源等带来的新问题, 以达到产生更小的干扰的同时进一步提升用户的吞吐量问题。

参考文献:

- [1] Lopez-Perez D, Ding M, Clausen H, et al. Towards 1 Gbps/UE in cellular systems; understanding ultra-dense small cell deployments [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2078-2101.
- [2] Ge Xiaohu, Cheng Hui, Guizani M, et al. 5G wireless backhaul networks: challenges and research advances [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 6-11.
- [3] Bletsas A, Shin H, Win M Z. Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(9): 3450-3460.
- [4] Nam S, Mai V, Tarokh V. Relay selection methods for wireless cooperative communications [C] // Proc of the 42nd Annual Conference on Information Sciences and System. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 859-864.
- [5] Jing Yindi, Jafarkhani H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1414-1423.
- [6] 赵季红, 闫飞宇, 曲桦, 等. 整体优化的吞吐量预测中继选择策略 [J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(2): 35-38.
- [7] Sathya V, Ramamurthy A, Kumar S S, et al. On improving SINR in LTE HetNets with D2D relays [J]. Computer Communications, 2016, 83(C): 27-44.
- [8] Deng Junquan, Dowhuszko A A, Freij R, et al. Relay selection and resource allocation for d2d-relaying under uplink cellular power control [C] // Proc of IEEE Globecom Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [9] 文凯, 卢彦博, 刘敏, 等. D2D 通信系统中一种资源分配算法的研究 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2015, 35(6): 31-38.
- [10] Feng Daquan, Lu Lu, Yi Yuanwu, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Trans on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [11] 黄俊伟, 刘晓江. 基于 Kuhn-Munkres 最优匹配的 D2D 资源分配算法设计 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3): 827-829.