·移动互联与通信技术·　　文章编号：1000-3428(2018)11-0090-05　　文献标志码：A　　中图分类号：TN929.5

一种毫米波蜂窝网络中的 D2D 资源分配方案

文　凯[1,2]，陈永丽[1]，颜　飙[1]

（1. 重庆邮电大学 通信新技术应用研究中心，重庆 400065；2. 重庆信科设计有限公司，重庆 401121）

摘　要：在 5G 系统中，毫米波（mmWave）与终端直通（D2D）通信技术有利于提升系统吞吐量和频谱利用率。针对 28 GHz 下的 underlay 蜂窝网络，提出一种 D2D 资源分配方案，以减少 D2D 用户在蜂窝网络中复用蜂窝资源时所带来的整体干扰。利用线性相关方法找出每一个 D2D 用户可复用的蜂窝用户集合。对 D2D 用户进行功率控制以确保 D2D 用户的通信质量。同时，为达到最大化系统总吞吐量的优化目标，提出一种基于干扰管理的启发式算法，并利用匈牙利算法求出最优匹配。仿真结果表明，与随机分配算法和个体干扰最小算法相比，该算法能够有效减少干扰，提高系统的总吞吐量和频谱利用率。

关键词：终端直通技术；毫米波；功率控制；资源分配；吞吐量

中文引用格式：文　凯，陈永丽，颜　飙. 一种毫米波蜂窝网络中的 D2D 资源分配方案[J]. 计算机工程，2018，44(11)：90-94.

英文引用格式：WEN Kai，CHEN Yongli，YAN Biao. A D2D resource allocation scheme in millimeter wave cellular network[J]. Computer Engineering，2018，44(11)：90-94.

A D2D Resource Allocation Scheme in Millimeter Wave Cellular Network

WEN Kai[1,2]，CHEN Yongli[1]，YAN Biao[1]

（1. Research Center of New Communication Technology Application，
Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，China；
2. Chongqing Information Technology Designing Co.，Ltd.，Chongqing 401121，China）

【Abstract】In the 5G system，millimeter wave（mmWave）and Device-to-Device（D2D）communication technology are beneficial to improve the system throughput and spectrum utilization. For underlay cellular network under 28 GHz，a D2D resource allocation scheme is proposed to reduce the overall interference when D2D users reuse cellular resources in the cellular network. The linear correlation method is used to find out the reusable cellular user set for each D2D user. In order to ensure the communication quality of D2D users，the power of D2D users is controlled. Meanwhile，in order to maximize the total throughput of the system，a heuristic algorithm based on interference management is proposed，and the optimal matching is obtained by using the Hungarian algorithm. Simulation results show that，compared with the random assignment algorithm and the individual interference minimization algorithm，this algorithm can effectively reduce the interference，improve the total throughput and spectral efficiency of the system.

【Key words】Device-to-Device（D2D）technology；millimeter wave（mmWave）；power control；resource allocation；throughput

DOI：10.19678/j.issn.1000-3428.0049158

0　概述

随着移动网络数据流量的指数式增长，目前频谱资源紧张的现状已然满足不了通信发展的需要，因此需要拥有新技术的下一代无线通信系统[1-2]。在未来的 5G 网络中，要结合运用通信新技术，以满足日益增长的移动数据流量需求。毫米波（millimeter wave，mmWave）、终端直通（Device-to-Device，D2D）等技术得到了研究学者的关注。将 D2D 通信应用于毫米波蜂窝网络能提高网络性能，如吞吐量、频谱效率等，但如何减少网络中复用频谱资源带来的干扰成为目前研究的热点和难点。

毫米波属于甚高频段（30 GHz～300 GHz），此波段频带资源十分丰富，能够为紧张的频谱资源现状带来很大的优势[3]。毫米波具有单跳通信距离较短、干扰源少、可提供千兆位的通信服务、能够大

基金项目：重庆市研究生科研创新项目（CYS15166）。

作者简介：文　凯（1972—），男，高级工程师、博士，主研方向为移动通信、认知网络；陈永丽、颜　飙，硕士研究生。

收稿日期：2017-11-02　　**修回日期：**2017-12-10　**E-mail：**3088197757@qq.com

幅提升系统容量和传输速率等优点[4]。不过由于毫米波易受建筑物的阻挡,因此其适用于大型商场、机场、体育馆等室内场景和街道、车站等室外场景[5]。

D2D 技术可以在基站的控制下,实现设备彼此间的直接通信,不再需要通过基站来转发[6]。将 D2D 通信技术应用于蜂窝网络中具有以下优势:可以增加通信系统容量,提高系统频谱效率,提升数据传输速率,降低基站负载等[7]。但是当 D2D 用户进行资源复用时会对蜂窝系统带来干扰,这些干扰会严重影响系统性能[8]。因此,如何有效地管理这些干扰成为 D2D 通信的研究重点之一。目前,大量的研究已经专注于这个方向并对资源分配方案进行了研究。

文献[9]提出一种资源分配方案,但是此方案只考虑单个 D2D 用户带来的干扰,而忽略了所有 D2D 用户对系统带来的整体干扰。文献[10]研究一种能效算法,利用拉格朗日对偶理论,并联合优化功率和数据速率来增加 D2D 网络的能效,但是该算法没有考虑 D2D 通信对蜂窝通信造成的整体干扰。文献[11]在 28 GHz 带宽下提出一种频谱资源管理方案,在一定程度上提高了系统吞吐量,但只是简单地对 D2D 用户进行资源分配。文献[12]资源共享的方案,允许无干扰的 D2D 链路共享资源,并能在提高网络容量的同时保持很好的网络连通性,但是在实际应用中不可避免的存在干扰。

本文在 28 GHz 毫米波蜂窝网络中,针对 D2D 用户在复用蜂窝用户资源时产生的干扰问题提出一个解决方案,同时将最大化系统总吞吐量作为优化目标。首先,通过线性相关方法选择出每一个 D2D 用户可复用的蜂窝用户集合;然后,为提高 D2D 用户的吞吐量,对 D2D 用户的发射功率进行合理地调整;最后,提出一个基于最小化 D2D 用户对蜂窝链路造成整体干扰的资源分配方案,以降低 D2D 用户对蜂窝用户的干扰。

1　系统模型

1.1　网络模型

在 28 GHz 下的 D2D 通信和蜂窝通信共存的城市蜂窝网络环境中,由毫米波基站控制无线资源,如图 1 所示,蜂窝用户与 D2D 对共享下行链路资源。假设有 N 个蜂窝用户存于集合 C 中,记为 $C\{j=1,2,\cdots,N\}$,每个蜂窝用户被分配一个固定的资源块(Resource Block,RB);有 M 个 D2D 对用户存于集合 D 中,记为 $D\{i=1,2,\cdots,M\}$,并且 D2D 对满足距离要求,同时符合通信要求。在此模型中,假设基站知道所有用户的信道状态信息,并且假设一个 RB 只能被一个 D2D 用户复用,同时一个 D2D 用户只能复用一个蜂窝用户的 RB。

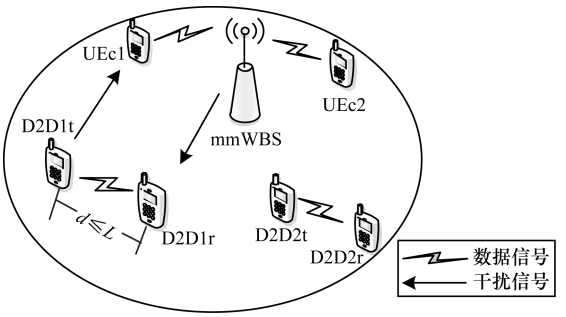


图 1　下行链路的 underlay 蜂窝网络模型

蜂窝用户 j 和 D2D 对 i 的接收信号分别为

$$y_j=\sqrt{p_B}h_{B,j}x_j+\sum_{i=1}^{M}\lambda_{i,j}\sqrt{p_i}h_{i,j}x_i+n_j \tag{1}$$

$$y_i=\sqrt{p_i}h_{i,i}x_i+\sqrt{p_B}h_{B,i}x_j+n_i \tag{2}$$

其中,p_B 和 p_i 分别是 BS、D2D 对发射机的发送功率,$h_{i,j}$是链路 i-j 的链路响应,n_j 和 n_i 是高斯白噪声,其单边频谱密度为 N_0,$\lambda_{i,j}$代表蜂窝用户是否和 D2D 对分享资源,若 $\lambda_{i,j}=1$ 代表两者之间共享,$\lambda_{i,j}=0$代表两者之间不共享。

1.2　信道模型

本文研究是在 28 GHz 毫米波中考虑实际的户外传输条件,文献[13]通过在纽约市进行的大规模测量中得出,在这种用户量比较大以及障碍物比较多的户外城市环境中只是进行视距的传输是不太现实的,因为其特征在于角度信号以不同的时延复制。因此,在此场景下接收信号经历的路径损耗(Path Loss,PL)包括视距 LOS 和非视距 NLOS 分量,并结合每一部分相对应的对数正态阴影衰落。路径损耗模型 PL 的计算为 $PL=PL_{\text{LOS}}+PL_{\text{NLOS}}$。根据对数距离路径损耗模型计算路径损耗模型,对于一个距离d,各部分的 PL 值根据标准线性模型$PL_X(d)[\text{dB}]=\mu+10\upsilon\lg[d(m)]+\varepsilon$来计算,其中,$\varepsilon$ 为响应对数正态阴影,服从 $N(0,\sigma^2)$分布,μ 为路径损耗系数,υ 为路径损耗指数。在这里,本文将概率引入到对数正态路径损耗和阴影模型中,由于 D2D 通信本身近距离的特性,D2D 链路更易接收较多的 LOS 信号。因此,D2D 链路的路径损耗 PL_1 为:

$$PL_1=p_1PL_{\text{LOS}}+(1-p_1)PL_{\text{NLOS}} \tag{3}$$

其他链路的路径损耗 PL_2 为:

$$PL_2=p_2PL_{\text{LOS}}+(1-p_2)PL_{\text{NLOS}} \tag{4}$$

并且毫米波通信中的多径衰落是莱斯信道。

1.3　问题描述

本文研究是在毫米波蜂窝网络中对 D2D 用户进行资源分配,目标是使蜂窝用户和 D2D 用户总吞吐量最大化。通过对 D2D 发射功率的调整,在满足蜂窝用户的信干扰比(Signal to Interference plus Noise Ratio,SINR)的条件下使得 D2D 对的吞吐量得到改善。在本文中,蜂窝用户 j 和 D2D 用户 i 的 SINR 分别为:

$$r_j=\frac{p_B H_{B,j}}{\sum_{i=1}^{M}\lambda_{i,j}p_i H_{i,j}+N_0},j=1,2,\cdots,N \tag{5}$$

$$r_i=\frac{p_i H_{i,i}}{p_B H_{B,i}+N_0},i=1,2,\cdots,M \tag{6}$$

其中，$\lambda_{i,j}$表示第 i 个 D2D 对和第 j 个蜂窝用户复用资源的关系，$H_{i,j}$表示 i-j 链路的信道增益，$H_{i,j}=h_{i,j}^2$。

由香农公式 $R=B\text{lb}(1+SINR)$可得，蜂窝用户 j 的数据速率为 $R_j=B\text{lb}(1+r_j)$，D2D 用户 i 的数据速率为 $R_i=B\text{lb}(1+r_i)$，因此总吞吐量的优化问题可以表示为：

$$\text{argmax}\sum_{j\in C}\sum_{i\in D}(R_j+R_i) \tag{7}$$

约束条件：

$$r_j\geqslant r_c^{\text{th}},j=1,2,\cdots,N \tag{8}$$

$$r_i\geqslant r_d^{\text{th}},i=1,2,\cdots,M \tag{9}$$

其中，r_c^{th}，r_d^{th} 为蜂窝用户和 D2D 用户的 SINR 阈值，是对蜂窝用户和 D2D 用户 SINR 的限制。

文献[14]已经证明了式(7)中总吞吐量的优化问题为非线性限制优化问题，其很难直接获得，这是因为资源分配方案和功率控制直接影响整个系统的吞吐量。鉴于此，本文将优化问题分为 3 个方面去解决。首先，利用线性相关方法来找出 D2D 用户的接入集合；然后，在保证蜂窝用户服务质量(Quality of Service，QoS)的条件下合理地调整 D2D 用户的发射功率，以尽量提高 D2D 用户的吞吐量；最后，为最大化系统总吞吐量，提出一种基于整体干扰最小的资源分配方案，合理地为 D2D 用户分配蜂窝用户资源。

2 资源分配

2.1 D2D 对的接入集合

如图 2 所示，引用文献[15]使用的线性规划方法，对于每一个 D2D 用户，可以求出其接入集合 Ω_i。在满足限制条件式(8)和式(9)时，Ω_i 中包含 D2D 用户 i 的所有潜在可进行复用的蜂窝用户。由限制条件式(8)和式(9)可以得到：

$$\begin{aligned}&a_1:p_B H_{B,j}\geqslant r_c^{\text{th}}(p_i H_{i,j}+N_0)\\&a_2:p_i H_{i,i}\geqslant r_d^{\text{th}}(p_B H_{B,i}+N_0)\end{aligned} \tag{10}$$

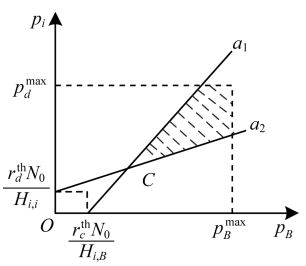


图 2 潜在的复用对象

由不等式(10)可以得出图 2 中交点 C 所对应的值的表达式：

$$C=\{x_C;y_C\}=\left\{\begin{array}{l}N_0\dfrac{H_{i,i}r_c^{\text{th}}+H_{i,j}r_c^{\text{th}}r_d^{\text{th}}}{H_{i,i}H_{B,j}-r_c^{\text{th}}r_d^{\text{th}}H_{B,i}H_{i,j}};\\\dfrac{H_{B,i}r_c^{\text{th}}r_d^{\text{th}}+H_{B,j}r_d^{\text{th}}}{H_{i,i}H_{B,j}-r_c^{\text{th}}r_d^{\text{th}}H_{B,i}H_{i,j}}\end{array}\right\}$$

只有当 a_1 和 a_2 有交点 C 时 D2D 用户才有可复用的蜂窝用户资源，并且交点 C 要在图 2 中虚线和坐标所围成的区域内时，才能保证蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量。图 2中的阴影区域为 p_i 和 p_B 的可行域。

如果用户的信道增益满足：

$$(x_C;y_C)\leqslant(p_B^{\max};p_d^{\max}) \tag{11}$$

那么蜂窝用户 j 属于 D2D 用户 i 的接入集合。不等式(11)表明 D2D 用户的可用传输功率，并且基站的发射功率不超过最大值。

2.2 D2D 用户的功率控制

假设 D2D 用户 i、复用蜂窝用户 $j\in\Omega_i$，即 $\lambda_{i,j}=1$，对 D2D 用户进行功率分配。为在保证蜂窝用户 QoS 的条件下尽量提高 D2D 用户的吞吐量，需要增加 D2D 用户的发射功率，并适当的减小基站的发射功率。由式(5)和式(8)可以得到：

$$\frac{p_B H_{B,j}}{p_i H_{i,j}+N_0}\geqslant r_c^{\text{th}} \tag{12}$$

因此，基站的最小发射功率为

$$p_B^*=\frac{r_c^{\text{th}}}{H_{B,j}}(p_i H_{i,j}+N_0) \tag{13}$$

将式(13)代入到 $R_i=B\text{lb}(1+r_i)$可得：

$$R_i=B\text{lb}\left(1+\frac{p_i H_{i,i}}{p_B H_{B,i}+N_0}\right)=B\text{lb}\left(1+\frac{H_{i,i}}{\dfrac{r_c^{\text{th}}H_{i,j}H_{B,i}}{H_{B,j}}+\dfrac{N_0}{p_i}\left(1+\dfrac{r_c^{\text{th}}H_{B,i}}{H_{B,j}}\right)}\right) \tag{14}$$

从式(14)可以看出，随着 p_i 的增加 D2D 用户的吞吐量是呈单调递增的。因此，D2D 用户 i 的发射功率在满足蜂窝用户通信质量的条件下可以尽可能地大，从图 2 中可以看出：

$$p_i^*=\min\{p_d^{\max},y_C\} \tag{15}$$

2.3 资源分配方案

本文是在已有方案的基础上提出一种基于整体干扰最小的资源分配方案，以保证接入的所有 D2D 用户对原有的蜂窝链路造成的干扰最小。

2.3.1 基于个体干扰最小的资源分配方案

文献[9]提出一种基于个体干扰最小的资源分配方案，该方案的基本思想是首先估计出小区内的 D2D 用户对之间的信道增益；然后为链路质量好的 D2D 用户优先选择复用的资源，并且选择复用受到该 D2D 用户干扰最小的蜂窝用户资源，选择好后将此 D2D 用户和其复用的蜂窝用户从各自的集合中去除；再为链路质量次优的 D2D 用户选择合适的复用资源，直到所有的 D2D 用户都分配到资源为止。

2.3.2　基于整体干扰最小的资源分配方案

参考文献[9],本文提出一种基于整体干扰最小的资源分配方案。为了最大化系统总吞吐量,本文将优化问题转为最小化由 D2D 复用资源引起的整体干扰问题,然后将整体干扰最小的求解问题转为蜂窝链路和 D2D 链路之间的最优匹配问题,以便能够达到最小化 D2D 用户复用蜂窝用户带来的干扰。因此需要找到每个 D2D 对的 $\lambda_{i,j}$ 的优化值,建立一个 $M \times N$ 维的优化分配矩阵 $\boldsymbol{X}_{M\times N}$。

首先,每个 D2D 用户在可复用的蜂窝用户集合中计算其对蜂窝用户的干扰值,记为 $i_{i,j}$,$i_{i,j}=p_i H_{i,j}$,并将对应的优化值设置为 $\lambda_{i,j}=1$;将其对不可复用的蜂窝用户的干扰记为无穷大,其对应的 $\lambda_{i,j}=0$。

其次,将干扰矩阵 $\boldsymbol{I}_{M\times N}$ 转化为 $\boldsymbol{X}_{M\times N}$ 的 0-1 分配的优化问题,目标是找到优化资源分配方法,达到最小化总的信道干扰,可描述为:

$$\operatorname{argmin} I_{总}=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\lambda_{i,j}I_{i,j} \tag{16}$$

约束条件:

$$\begin{cases}\sum\limits_{i=1}^{M}\lambda_{i,j}=1, j=1,2,\cdots,N\\ \sum\limits_{j=1}^{N}\lambda_{i,j}=1, i=1,2,\cdots,M\\ \lambda_{i,j}\in\{0,1\}, j=1,2,\cdots,N, i=1,2,\cdots,M\\ I_{i,j}\geqslant 0, j=1,2,\cdots,N, i=1,2,\cdots,M\end{cases}$$

其中,约束条件前 2 个式子代表一个蜂窝用户只能与一个 D2D 对分享资源且一个 D2D 对也只能复用一个蜂窝用户资源,第 3 个式子表示资源复用指示的值要么为 0 要么为 1,第 4 个式子表明信道干扰是非负的。

最后,利用匈牙利算法得到最优分配矩阵 $\boldsymbol{X}^{*}_{M\times N}=[\lambda^{*}_{i,j}]_{M\times N}$。

综上所述,为 D2D 用户进行资源分配的流程如下:

步骤 1　基站知道所有用户信道链路的状态信息。

步骤 2　为每一个 D2D 用户选出可复用的蜂窝用户资源。

步骤 3　为每一个 D2D 用户选择合适的发射功率。

步骤 4　根据步骤 2 计算出每一个 D2D 用户对可复用的蜂窝用户产生的干扰。

步骤 5　形成优化分配矩阵 $\boldsymbol{X}_{M\times N}$。

步骤 6　利用匈牙利算法求出最优分配矩阵 $\boldsymbol{X}^{*}_{M\times N}=[\lambda^{*}_{i,j}]_{M\times N}$。

2.4　算法复杂度分析

本文算法的时间复杂度主要来源于匈牙利算法,为 $O(NM^2)$,复杂度较高,而个体干扰最优算法只进行一次选择排序,其算法复杂度为 $O(NM)$,随机分配算法只是蜂窝用户和 D2D 用户的随机分配,因此其算法复杂度也为 $O(NM)$,它们相比于本文所提算法降低了一个幂次。因此,本文算法是在牺牲算法复杂度的基础上提升系统性能的。

3　仿真验证

3.1　仿真参数

本文在 5G mmWave 28 GHz 下的户外城市蜂窝网络中对算法进行验证,其路径损耗值是基于文献[11]、文献[13]计算,在此场景下提供资源分配的仿真结果,利用 MATLAB 进行仿真,主要的仿真参数如表 1 所示。

表 1　主要的仿真参数

参数名	参数值
小区半径/m	500
RB 带宽/kHz	180
蜂窝用户数	20
D2D 对数	20
D2D 距离/m	10
基站发射功率/dBm	43
用户最大发射功率/dBm	25
预定义的有效 SINR/dB	0
噪声功率密度/(dBm·Hz^{-1})	-174
LOS 路损/dB	$PL(d)=61.4+20\lg[d(m)]+\varepsilon$; $\varepsilon\sim N(0,5.8)$
NLOS 路损/dB	$PL(d)=72+29.2\lg[d(m)]+\varepsilon$; $\varepsilon\sim N(0,8.7)$
D2D 链路的路损模型	$PL_1=0.8PL_{\mathrm{LOS}}+0.2PL_{\mathrm{NLOS}}$
非 D2D 链路的路损模型	$PL_2=0.2PL_{\mathrm{LOS}}+0.8PL_{\mathrm{NLOS}}$
莱斯信道系数 K	5

3.2　仿真结果

图 3 为系统总吞吐量和 D2D 用户之间距离的关系曲线。从图 3 可以看出,当 $d<30$ m 时,系统总吞吐量随 D2D 对之间距离的增大而减少,且减少的程度较大;当 $d>30$ m 时,系统总吞吐量随着 D2D 对之间距离的增大则变化甚微。这主要是因为当 d 较小时,D2D 链路质量较好,对系统总吞吐量的影响很大,但是当 d 较大时,D2D 链路质量会变的很差,对系统总吞吐量几乎没有影响。并且从图 3 可以看出,本文算法优于其他 2 种算法,这表明本文方法能够有效提高小区总吞吐量。

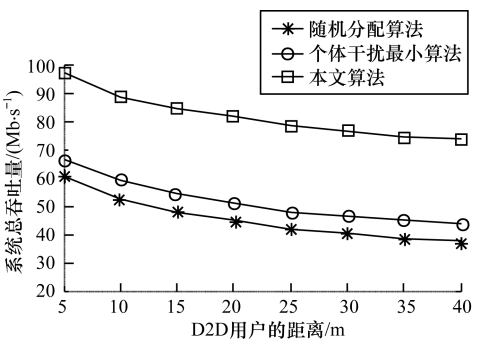


图 3　系统总吞吐量和 D2D 用户之间距离的关系

图 4 为不同资源分配算法下蜂窝用户的信干扰比(SINR)的累积分布函数(Cumulative Disribution Function,CDF)曲线。从图 4 可以看出,相比于其他 2 种算法,本文算法提高了蜂窝链路的 SINR,原因是其旨在最小化整体蜂窝链路的频谱复用干扰,根据

目标函数式(16),每一个 D2D 对和蜂窝用户之间的优化匹配关系将会被建立。然而个体干扰最小算法只关注单个蜂窝链路的干扰达到最小,而忽略了整体链路的干扰情况,因此,单个蜂窝链路和 D2D 对之间的资源分配可能是最优的,但是对于整体蜂窝链路则不是最优的。而对于随机分配算法,其仅是蜂窝链路和 D2D 对之间的随机分配,并没有考虑干扰问题,因此其性能是最差的。

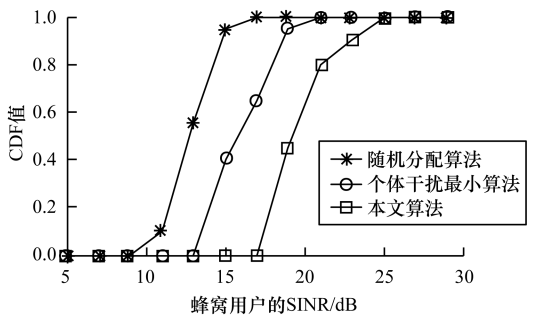


图 4 不同算法下蜂窝用户 SINR 的 CDF 曲线

图 5 为不同资源分配算法下的系统吞吐量(每个蜂窝用户和复用其资源的 D2D 用户的吞吐量)的 CDF 曲线。由于 D2D 用户和蜂窝用户共同使用同一个资源,那么必然是存在干扰的,因此通过对干扰的控制可以使系统吞吐量提高。从图 5 可以看出,本文算法的系统吞吐量是最高的,因为随机分配算法没有考虑干扰问题,个体干扰最小算法只考虑了个体干扰最小,而忽略了整体链路干扰问题。

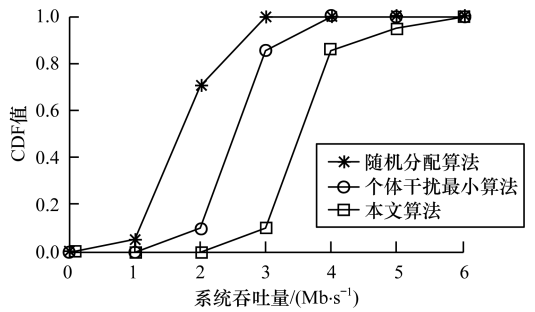


图 5 不同算法下系统吞吐量的 CDF 曲线

4 结束语

为降低 D2D 用户对蜂窝用户产生的干扰,达到最大化系统总吞吐量的优化目标,本文基于城市毫米波小区中的蜂窝用户和 D2D 用户共存的混合网络,提出一种基于干扰管理的启发式算法。为确保 D2D 用户的通信质量,对 D2D 用户进行功率控制,最后利用匈牙利算法求出最优匹配。仿真结果表明,本文算法可以有效降低 D2D 用户和蜂窝用户之间的干扰,提高系统吞吐量,提升系统性能。本文主要研究的是 28 GHz 毫米波频段中一对一复用的场景,下一步将考虑一个蜂窝用户的资源被多个 D2D 用户复用或者多个蜂窝用户的资源被一个 D2D 用户使用的场景,并且在其他毫米波频段(如 E 带宽)下对 D2D 资源分配进行研究。

参考文献

[1] IMT-2020 (5G) PROMOTION GROUP. White paper on 5G wireless technology architecture[EB/OL]. [2017-10-02]. http://www.imt-2020.cn/.

[2] 方汝仪. 5G 移动通信网络关键技术及分析[J]. 信息技术,2017(1):142-145.

[3] AGRAWAL S K, SHARMA K. 5G millimeter wave (mmWave) communications[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development. Washington D. C., USA:IEEE Press,2016:3630-3634.

[4] KARJALAINEN J, NEKOVEE M, BENN H, et al. Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5G networks[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Washington D. C., USA:IEEE Press,2014:372-376.

[5] SHEN X. Device-to-device communication in 5G cellular networks[J]. IEEE Network,2015,29(2):2-3.

[6] IMT-ADVANCEDPROMOTION GROUP. IMT-advanced D2D(Device-to-Device)技术白皮书[EB/OL]. [2017-10-02]. https://wenku.baidu.com/view/2831a2b4b8f67c1cfbd6b832.html? from=search.

[7] 焦 岩,高月红,杨鸿文,等. D2D 技术研究现状及发展前景[J]. 电信工程技术与标准化,2014(6):83-87.

[8] 文 凯,卢彦博,夏 威,等. D2D 通信资源调度研究现状综述[J]. 电视技术,2015,39(22):44-48.

[9] HAN T, YIN R, XU Y, et al. Uplink channel reusing selection optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press,2012:559-564.

[10] MUMTAZ S, HUQ K M S. Energy-efficient interference management in LTE-D2D communication[J]. IET Signal Processing,2016,10(3):197-202.

[11] GUIZANI Z, HAMDI N. Spectrum resource management and interference mitigation for D2D communications with awareness of BER constraint in mmWave 5G underlay network[C]//Proceedings of 2016 IEEE Symposium on Computers and Communication. Washington D. C., USA: IEEE Press,2016:855-860.

[12] QIAO J, SHEN X S. Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine,2015,53(1):209-215.

[13] AKDENIZ M R, LIU Y, SAMIMI M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evalua-tion[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2013,32(6):1164-1179.

[14] FENG D, LU L, YI Y W, et al. Device-to-Device communications underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.

[15] HUYNH T, ONUMA T, KURODA K, et al. Joint downlink and uplink interference management for device to device communication underlaying cellular networks[J]. IEEE Access,2016,4:4420-4430.

编辑 司森森