



毫米波 5G 网络中 D2D 通信的资源分配方案

易冰^{1,2}, 陈永丽¹, 赵瑞雪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: 由于将终端直通 (device-to-device, D2D) 技术与 mmWave 技术结合可以满足大容量的需求, 考虑在户外毫米波场景下对 D2D 用户进行资源分配, 其优化目标是最大化系统总的吞吐量。首先, 通过线性相关方法选择出每个 D2D 用户的准入集合; 然后, 对 D2D 用户进行功率控制, 选择其最佳的发射功率; 最后, 提出一种基于二部图的多阶段匹配算法为 D2D 用户分配资源, 并利用多次 KM 算法求出分配结果。仿真结果表明, 所提算法性能优于对比算法, 有效提高了系统吞吐量和频谱利用率。

关键词: 终端直通; 毫米波; 资源分配; 吞吐量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019013

Resource allocation scheme for D2D communication in mmWave 5G networks

YI Bing^{1,2}, CHEN Yongli¹, ZHAO Ruixue¹

1. Research Center of New Telecommunication Technology Applications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Chongqing Information Technology Designing Co., Ltd., Chongqing 401121, China

Abstract: Since the combination of device-to-device (D2D) and mmWave technology can meet the needs of large-capacity, resource allocation was considered for D2D users in an outdoor millimeter wave scenario. The optimal objective was maximize to the total system throughput. Firstly, the admission set of each D2D user was selected by a linear correlation method. Then, power control was performed on the D2D user to select the optimal transmit power. Finally, a multi-phase matching algorithm based on bipartite graph was proposed to allocate resources for D2D users, and the allocation result was obtained by using multiple KM algorithms. The simulation results show that the proposed algorithm is superior to the comparison algorithm, which effectively improves the throughput of the system and spectrum utilization.

Key words: device-to-device, millimeter wave, resource allocation, throughput

1 引言

随着数据密集型应用的数量急剧增长,对更高数据速率和每个小区呼叫流量密度的需求也在不断增加。目前的4G技术,由于带宽不足,无法满足日益增长的需求。5G蜂窝技术将被用于通过探索毫米波(millimeter wave, mmWave)频谱来克服频谱短缺^[1-2]。由于毫米波的高频率和短距离衰减特性,可以通过减少干扰来提高传输质量。户外传播环境提供28 GHz及以上频率的丰富多路径,可用于改善接收信号功率,特别是非视距(non-line of sight, NLOS)传播的情况^[3]。除此之外,定向波束成形和智能天线可以改善链路传播质量^[4]。

终端直通(device-to-device, D2D)技术可以在基站的控制下,实现设备彼此间的直接通信,并且无需通过基站来转发^[5]。D2D技术可以将两台设备连接在一起,减少基站负载,从而支持更多的并发用户。D2D通信拥有数据速率高、频谱效率高的优点,同时也提高了吞吐量,降低了时延^[6]。因此,将D2D通信技术应用于蜂窝网络中,利用D2D技术本身的短距离通信特点和直接通信方式,充分发挥D2D在节省无线资源、减小系统干扰以及业务提供等方面的巨大优势和潜力,拓展网络覆盖、提高无线资源使用效率和系统容量,并更好地适应本地数据业务的需求。邻近的设备可以通过额外的信令和控制相互通信,实现与传统的蜂窝通信的共存^[7]。

采用毫米波技术与D2D通信相结合的5G网络将获得高带宽和频谱效率的优势^[8]。此外,mmWave是短距离通信,D2D基于邻近通信,这更有助于获得两种技术共同使用时的优点。D2D通信以集中式或者分布式方式存在于小区边缘或者拥塞区域^[9]。在这样的网络中面临着两种干扰:多个D2D连接时D2D间的干扰以及D2D与基站对设备通信的干扰。所以在并发的D2D和毫米波

网络中需要采用有效的资源共享和干扰避免技术。参考文献[10]所采用的是一种最大带权匹配比例公平的资源分配算法。首先对用户进行功率的调整来使用户的加权和速率最大化,然后通过使用最大带权匹配算法为D2D用户进行可用资源的分配,以达到系统总的加权和速率最大。但是蜂窝用户和D2D用户组成的复用对是在满足某一条件下随机选取的。所以虽然对系统性能有一定的提升,但是还需要进一步的研究。参考文献[11]将无线资源分配问题转化为混合整数非线性规划,提出一种新颖的贪婪启发式算法,利用信道增益信息来减少对蜂窝网络的干扰,从而改善小区总吞吐量。参考文献[12]在满足蜂窝用户和D2D用户的信号与干扰加噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR)的条件下,通过最大化总的速率分配方案为D2D用户进行资源分配。参考文献[11]、参考文献[12]虽可以在一定基础上保证服务质量(quality of service, QoS),但系统吞吐量只能得到有限的提升。毫米波D2D通信多用于室内,较少用于户外传输。在参考文献[13]中,针对5G网络中的毫米波传播讨论了定向上行链路测量。参考文献[14]在毫米波小蜂窝中提出一个有效的关于流行内容下载的方案,在此网络下D2D通信的近距离和并行传输提高了传输效率。

由于对户外情况下毫米波频段的研究相对较少,并且根据参考文献[1]所述,28 GHz频段比其他毫米波频段更有利。所以,主要研究28 GHz下的户外城市蜂窝网络中的D2D资源分配问题,以使系统总的吞吐量最大化。鉴于此,本文提出一种基于二部图的多阶段匹配算法,可以为蜂窝用户选择合适的D2D用户共享资源。进行资源分配之前,在满足蜂窝用户和D2D用户的QoS的条件下,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,与此同时,为了提高D2D用户的吞吐量,对D2D用户进行功率控制。另外,毫米波频带中可分配的资源块数比LTE-Advanced



系统多,极大地满足了 5G 应用场景通信标准技术要求。

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型

假设在 D2D 用户和蜂窝用户共存的 5G 城市蜂窝网络场景下,利用蜂窝系统中的上行链路资源,在 28 GHz 蜂窝网络中按照 underlay 方式讨论多对 D2D 用户复用同一资源的分配方法。该情况下,D2D 用户与蜂窝用户 (cellular user, CUE) 之间避免不了干扰的存在,而对于多个使用相同资源的 D2D 用户间的干扰也同样不可忽视。假设每个蜂窝用户被分配一个相互正交的资源块 (resource block, RB),那么资源块的数量就是蜂窝用户的数量,存储于集合 $C=\{1,2,3,\dots,N\}$ 中,D2D 对的数量存储于集合 $D=\{d=1,2,3,\dots,M\}$ 中。D2D₁ 和 D2D₃ 复用同一个蜂窝用户 CUE₁ 时产生的干扰示意图如图 1 所示。

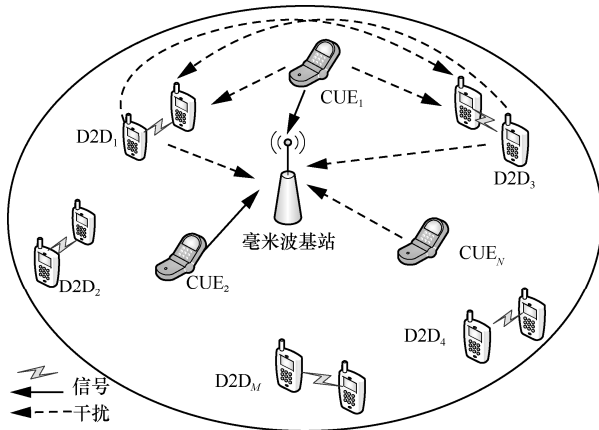


图 1 复用同一个单蜂窝用户 CUE₁ 时产生的干扰示意图

2.2 传输模型

考虑 28 GHz 毫米波实际的户外传输条件^[15],参考文献[15]收集了在美国纽约实施的大规模测量数据,并获得了详细的信道空间统计模型。在这种用户和障碍物密集的条件下视距传输是不切实际的,其特征在于角度信号以不同的时延复制^[16]。所以在此场景下接收信号经历的路径损耗

包括视距 (line of sight, LOS) 和非视距 (non-line of sight, NLOS),并结合每一部分相应的阴影衰落。故路径损耗 (PL) 模型的计算为 $PL = PL_{LOS} + PL_{NLOS}$ 。根据距离模型,对于距离 d 有:

$$PL_x(d) = \mu + 10\alpha \lg(d(m)) + \varepsilon \quad (1)$$

其中, ε 为响应对数正态阴影,服从 $N(0, \sigma^2)$, μ 为路径损耗系数, α 为路径损耗指数。

在这里将概率插入对数正态路径损耗和阴影模型中。由于 D2D 通信的近距离特性,所以倾向于 D2D 链路接收更多的 LOS 信号。

因此, D2D 链路的路径损耗 PL_1 为:

$$PL_1 = p_1 PL_{LOS} + (1 - p_1) PL_{NLOS} \quad (2)$$

其他链路的路径损耗 PL_2 为:

$$PL_2 = p_2 PL_{LOS} + (1 - p_2) PL_{NLOS} \quad (3)$$

毫米波通信中的多径衰落是莱斯信道。

2.3 问题描述

在 28 GHz 毫米波的小蜂窝网络中,将 N 个蜂窝用户的 RB 分配给 M 个 D2D 用户,分配矩阵 $X = \{x_{c,d}\}_{N \times M}$ 用于表示蜂窝用户 RB 的分配结果。

资源共享的优化目标是在保证蜂窝用户以及 D2D 用户的 SINR 的前提下最大化蜂窝用户和 D2D 用户总的吞吐量。在本文中,蜂窝用户和 D2D 用户的 SINR, r_c 、 r_d 分别为:

$$r_c = \frac{p_c H_{c,B}}{\sum_{d=1}^M x_{c,d} p_d H_{d,B} + N_c} \geq r_c^{\text{th}}, c=1,2,\dots,N \quad (4)$$

$$r_d = \frac{p_d H_{d,d}}{\sum_{c=1}^N x_{c,d} p_c H_{c,d} + \sum_{c=1}^N \sum_{d' \in D \setminus \{d\}} x_{c,d'} p_{d'} H_{d',d} + N_d} \geq r_d^{\text{th}}, d=1,2,\dots,M \quad (5)$$

其中, p_c 和 p_d 分别是蜂窝用户、D2D 对发射机的发送功率, $H_{i,j}$ 是链路 i - j 的信道增益, N_c 和 N_d 是高斯白噪声,都为 N_0 , r_c^{th} 、 r_d^{th} 为蜂窝用户和 D2D 用户的 SINR 阈值, $x_{c,d}$ 是二进制变量,表示第 d 个 D2D 对是否复用第 c 个蜂窝用户资源,

$x_{c,d}=1$ 表示复用, $x_{c,d}=0$ 表示不复用。

由香农公式 $R = B \log(1 + \text{SINR})$ 可得:

$$R_c = B \log(1 + r_c) \quad (6)$$

$$R_d = B \log(1 + r_d) \quad (7)$$

其中, B 为蜂窝用户信道资源的带宽, 则最大化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} R = \max_x \{ & \sum_{c=1}^N R_c + \sum_{d=1}^M R_d \} = \\ \max_x \{ & \sum_{c=1}^N B \log(1 + \frac{p_c H_{c,B}}{\sum_{d=1}^M x_{c,d} p_d H_{d,B} + N_0}) + \\ & \sum_{d=1}^M B \log(1 + \frac{p_d H_{d,d}}{\sum_{c=1}^N x_{c,d} p_c H_{c,d} + \sum_{c=1}^N \sum_{d' \in D \setminus \{d\}} x_{c,d'} p_{d'} H_{d',d} + N_0}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{p_c H_{c,B}}{\sum_{d=1}^M x_{c,d} p_d H_{d,B} + N_0} \geq r_c^{\text{th}}, c=1, 2, \dots, N \quad (8a)$$

$$\frac{p_d H_{d,d}}{\sum_{c=1}^N x_{c,d} p_c H_{c,d} + \sum_{c=1}^N \sum_{d' \in D \setminus \{d\}} x_{c,d'} p_{d'} H_{d',d} + N_0} \geq r_d^{\text{th}}, \quad d=1, 2, \dots, M \quad (8b)$$

$$p_c \leq p_c^{\max}, c=1, 2, \dots, N \quad (8c)$$

$$p_d \leq p_d^{\max}, d=1, 2, \dots, M \quad (8d)$$

$$\sum_{c \in C} x_{c,d} \leq 1, \forall d \in D \quad (8e)$$

其中, $p_c^{\max}$ 、 $p_d^{\max}$ 分别为蜂窝用户和 D2D 用户的最大发射功率。式 (8a)、式 (8b) 表示满足蜂窝用户和 D2D 用户的 SINR 要求的限制条件; 式 (8c)、式 (8d) 表示限制蜂窝用户和 D2D 用户的发射功率; 式 (8e) 表示一个 D2D 用户只能和一个蜂窝用户共享资源。

由于优化目标为非线性整数规划问题很难直接获得, 因此资源分配方案直接影响整个系统的吞吐量, 特别是在存在大量的 D2D 对的情况下。因此, 针对此问题, 采用以下资源分配方案, 首先, 利用线性相关方法找出 D2D 用户可复用的蜂

窝用户集合; 其次, 对 D2D 用户进行功率控制; 最后, 采取一种基于多阶段匹配的二部图 D2D 资源分配算法, 对不同用户之间进行频谱资源管理。

3 资源分配

3.1 D2D 用户可复用蜂窝用户集合

在满足蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量的要求下, 按照线性规划的方法为每个 D2D 用户求得其可复用的蜂窝用户集合。

如图 2 所示, 采用线性规划的方法, 在保证蜂窝用户以及 D2D 用户 QoS 的前提下, 筛选出 D2D 用户的准入集合也就是其潜在复用蜂窝用户集合^[17]。若蜂窝用户 c 属于集合 Π_d , 则每个蜂窝用户和每个 D2D 用户需符合式 (8a) 和式 (8b), 具体能够表示为:

$$\begin{aligned} \text{b1: } & p_c H_{c,B} \geq r_c^{\text{th}} (p_d H_{d,B} + N_0) \\ \text{b2: } & p_d H_{d,d} \geq r_d^{\text{th}} (p_c H_{c,d} + N_0) \end{aligned} \quad (9)$$

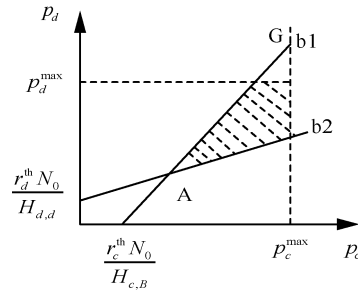


图 2 潜在复用对象的选择

由式 (9) 两个不等式可以求出图 2 中 A、G 点的值:

$$\begin{aligned} A = \{x_A, y_A\} &= \left\{ \begin{aligned} & N_0 \frac{H_{d,d} r_c^{\text{th}} + H_{d,B} r_c^{\text{th}} r_d^{\text{th}}}{H_{d,d} H_{c,B} - r_c^{\text{th}} r_d^{\text{th}} H_{c,d} H_{d,B}}, \\ & \frac{H_{c,d} r_c^{\text{th}} r_d^{\text{th}} + H_{c,B} r_d^{\text{th}}}{H_{d,d} H_{c,B} - r_c^{\text{th}} r_d^{\text{th}} H_{c,d} H_{d,B}} \end{aligned} \right\} \\ G = (x_G, y_G) &= \left\{ \begin{aligned} & p_c^{\max} \\ & \frac{p_c^{\max} H_{j,B} - r_c^{\text{th}} N_0}{r_c^{\text{th}} H_{i,B}} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

在图 2 中, 仅当存在交点 A 时 D2D 用户才存



在与其共享资源的蜂窝用户。而且交点 A 只有在坐标轴和图 2 中虚线所形成的区域内时,才可以确保蜂窝用户以及 D2D 用户的 QoS。图 2 中的阴影区域即 p_c 和 p_d 的可行传输功率区域。

并且若蜂窝用户 c 在集合 Π_d 中,则需要蜂窝用户和 D2D 用户的信道增益满足式 (11):

$$\{x_A, y_A\} \leq (p_c^{\max}, p_d^{\max}) \quad (11)$$

式 (11) 用来表明所有终端用户可行发射功率都不大于最大值。

3.2 对 D2D 用户进行功率控制

如果一个 D2D 用户 d 和一个蜂窝用户 $c \in \Pi_d$ 共同使用一个蜂窝资源,则对 D2D 用户进行功率分配。在确保蜂窝用户的 QoS 的要求下尽可能增大 D2D 用户的吞吐量。因此,应在增大 D2D 用户发射功率的同时适当地减小蜂窝用户的发射功率。由式 (8a) 得出:

$$\frac{p_c H_{c,B}}{p_d H_{d,B} + N_0} \geq r_c^{\text{th}} \quad (12)$$

因此,蜂窝用户的最小发射功率为:

$$p_c^* = \frac{r_c^{\text{th}}}{H_{c,B}} (p_d H_{d,B} + N_0) \quad (13)$$

将式 (13) 代入 $R_d = B \log(1 + r_d)$ 可得:

$$R_d = B \log \left(1 + \frac{p_d H_{d,d}}{p_c H_{c,d} + N_0} \right) = B \log \left(1 + \frac{H_{d,d}}{\frac{r_c^{\text{th}} H_{d,B} H_{c,d}}{H_{c,B}} + \frac{N_0}{p_d} \left(1 + \frac{r_c^{\text{th}} H_{c,d}}{H_{c,B}} \right)} \right) \quad (14)$$

分析式 (14) 能够得出,如果增大 p_d 的值, D2D 用户的吞吐量也会增大,并呈现出单调递增的趋势。因此,在保证蜂窝用户通信质量的前提下,对于 D2D 用户 d 的发射功率则应尽量地大,从图 2 中能够得出:

$$p_d^* = \min \{ p_d^{\max}, y_G \} \quad (15)$$

因此,从式 (15) 中可以得出 D2D 用户 d 的

最佳发射功率。

3.3 基于二部图的多阶段匹配算法

将 D2D 资源分配转化为最大权匹配问题,由基于二部图多阶段匹配算法来求解,目标是最大化总的系统吞吐量。

3.3.1 二部图的构建

构建一个二部图如图 3 所示,图 3 由两个顶点集和一个边集组成。顶点集 C 表示 N 个蜂窝用户,顶点集 D 表示 M 个 D2D 对,边集是连接一个蜂窝用户和一个 D2D 对的边的集合,一个蜂窝用户和一个 D2D 对之间有边表示该 D2D 对复用此蜂窝用户的资源。边的权重为蜂窝用户与相应的 D2D 对共享资源后在该资源上的吞吐量的增量。一个二部图的匹配是边的子集,任何两个边不能共享相同的顶点。最大权匹配是可以最大化权重的边的子集。因此,实现最大化总的吞吐量即在图 3 中找出最大加权图匹配。最大权重匹配可以通过 KM (Kuhn-Munkras) 算法求出^[18]。KM 算法要求两个顶点集合包含相同的顶点数。如果在两个集合中顶点数不相等,则需要加入至少一个虚拟顶点,其中虚拟顶点和其他顶点的边的权重为 0。

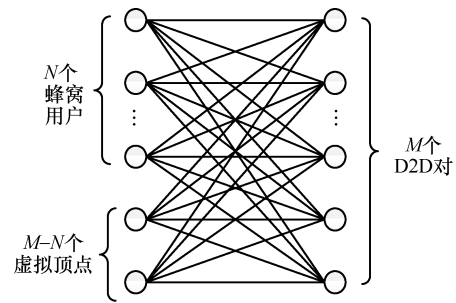


图3 二部图的图解

假设 $G=(C, D, E, W)$ 代表二部图。其中 C 是一个包含 N 个顶点的集合,包括 N 个蜂窝用户, $c(c=1,2,\dots,N)$ 代表蜂窝用户, D 是 M 个顶点的集合, $d(d=1,2,\dots,M)$ 代表一个 D2D 对, E 是一个 c 和 d 之间的边的集合, W 是边集合的权重。对于一个 D2D 用户,将不属于 D2D 用户接入集合的蜂窝用

户的权重置为 0, 对属于 D2D 用户接入集合的蜂窝用户进行权重的计算。首先将蜂窝用户的吞吐量记为 R_{c0} , 然后如果一个 d 复用分配给 c 的资源, 则总的吞吐量记为 $R_{c,d}=R_c+R_d$, 最后将吞吐量的增量即权重记为 $w_{c,d}$, $w_{c,d}=R_{c,d}-R_{c0}$ 。因此, W 可以表示为式 (16), 在过去的研究中, D2D 对的数量通常假设为低于蜂窝用户 CUE 的数量, 然而, 蜂窝网络应该能够容纳更多的 D2D 对。本文考虑 D2D 对的数量大于蜂窝用户数, 并且 $(M-N)$ 个虚拟顶点加入蜂窝用户顶点集合。

$$W_{M \times M} = \begin{pmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & \cdots & w_{1,M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{N,1} & w_{N,2} & \cdots & \cdots & w_{N,M} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & w_{M,M}=0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

3.3.2 多阶段匹配算法

构建二部图后, 在图 3 中的最大权重匹配可以通过使用 KM 算法获得, 考虑一些 D2D 对被分配给虚拟顶点, 多阶段匹配算法来重新分配资源给这些 D2D 对, 每一个阶段, 都会获得一个最大权重匹配, 在每两个阶段之间, 应进行图的更新。并将相应的分配矩阵 $X=\{x_{c,d}\}_{N \times M}$ 更新, 其操作如下所示。

图 2 中的点 G 执行 KM 算法后, 匹配结果, 首先 N 个蜂窝用户已经与 N 个 D2D 对匹配, 从而得到 N 个新的顶点 c^2 ($c=1,2,\dots,N$), C^2 由 c^2 ($c=1,2,\dots,N$) 组成; 其次 $(M-N)$ 个 D2D 对已经与虚拟顶点匹配, 所以应该将 $(M-N)$ 个 D2D 对重新匹配, 未匹配的 $(M-N)$ 个 D2D 对已经是一个新的顶点集 D^2 , 包括 d^2 ($d=1,2,\dots,M-N$), 同时有 $(M-2N)$ 个虚拟顶点加入 c^2 , E^2 连接 c^2 和 d^2 , 权重 W^2 是当 C^2 共享资源给 d^2 时的吞吐量的增量, 现在 $G=(C,D,E,W)$ 更新为 $G^2=(C^2,D^2,E^2,W^2)$ 。多阶段匹配算法和 KM 算法的详细步骤如下。

(1) 多阶段匹配算法步骤

步骤 1 构建一个二部图表示 N 个蜂窝用户

和 M 个 D2D 对。

步骤 2 若 $M \leq N$ 时, 添加 $(N-M)$ 个虚拟顶点到 D2D 对的顶点集合, 然后执行 KM 算法, 从而可得到分配结果。

步骤 3 若 $M > N$ 时, 添加 $(M-N)$ 个虚拟顶点到蜂窝用户顶点集, 执行 KM 算法得到匹配结果, 然后更新二部图, 判断 M 和 N 的大小, 若 $M > N$ 则循环此步骤, 否则返回步骤 2。

步骤 4 直到所有的 D2D 用户对都分配到资源为止。至此, 得到优化分配矩阵 $X=\{x_{c,d}\}_{N \times M}$ 。

(2) KM 算法步骤

步骤 1 计算出边集合的权重矩阵 $W_{Z \times Z}=\{w_{x,y}\}_{Z \times Z}$, 其中, $Z=N$ 或 $Z=M$, 将所有蜂窝用户 $C=\{1,2,\dots,N\}$ 或者所有蜂窝用户和虚拟顶点的组合构成顶点集 P , 所有的 D2D 用户 $D=\{1,2,\dots,M\}$ 和虚拟顶点的组合或者所有 D2D 用户构成顶点集 Q , 并为 P 集中的每一个顶点分配一个顶标 l_p , $l_p=\max\{w_{p,1}, w_{p,2}, \dots, w_{p,Z}\}$, 同理为 Q 集中的每一个顶点分配一个顶标 l_q , $l_q=0$, 初始化匹配矩阵 $M_{Z \times Z}$ 为零矩阵。

步骤 2 从集合 P 中第 1 个顶点起, 从集合 Q 中选择出未匹配且权重值最大的点进行查找, 搜寻增广路。若经过一个未匹配点, 则表明寻找成功, 将路径信息进行更新, 并将匹配的边数加 1, 不再搜索, 若一直未找到增广路, 那么停止从这个点开始搜索。

步骤 3 在匹配子图中添加此增广路径。

步骤 4 如果没有找到完备匹配, 那么需要修改顶标值。这条路径上的 P 顶点集为 S , Q 顶点集为 T , 对所有在 S 中的点及不在 T 中的点, 计算差值 $a=\{l_p+l_q-w_{p,q}\}$, 从 S 集中的 P 顶标中减去 a , T 集中的 Q 顶标加上 a 。

步骤 5 循环步骤 3、步骤 4, 直到找到所有二部图边权满足 $l_p+l_q=w_{p,q}$ 的相等子图的完备匹配, 即找到了匹配矩阵 $M_{Z \times Z}$ 。



综上所述,本文提出的一种为 D2D 用户分配资源的方案的步骤如下。

步骤 1 假设基站知道小区中用户的坐标,故可知蜂窝用户集合为 $C=\{c=1,2,3,\dots,N\}$, D2D 用户集合为 $D=\{d=1,2,3,\dots,M\}$ 。

步骤 2 找出每一个 D2D 用户潜在的复用蜂窝用户集合 Π_d 。计算由式 (9) 中得到的交点 A 并判断其是否满足式 (10) 要求,若满足则存储于集合 Π_d , $x_{c,d}=1$, 否则 $x_{c,d}=0$ 。

步骤 3 根据 $p_d^*=\min\{p_d^{\max}, y_G\}$ 选择合适的 D2D 发射功率。

步骤 4 构建二部图,计算权重 $w_{c,d}=R_{c,d}-R_{c0}$,若蜂窝用户 c 不在 D2D 用户 d 的潜在复用集合中,则其权重为 0。

步骤 5 进行多阶段匹配算法直到每个 D2D 用户都有资源进行通信。利用 $t=\lceil M/N \rceil$ 次 KM 算法求出优化匹配结果 $X^*=\{x_{c,d}^*\}_{N \times M}$ 。

3.4 复杂度分析

根据参考文献[18], KM 的时间复杂度为 $O(M^3)$, 又 KM 算法执行 $t=\lceil M/N \rceil$ 次, 所以多阶段匹配算法的复杂度为 $O(t \cdot M^3)$ 。

在本文中,对于 M 和 N 是相同的数量级时,所提算法的复杂度为 $O(t \cdot M^3)$, 并且复杂性在多项式时间内是可接受的。

4 仿真分析

4.1 仿真参数

在 28 GHz mmWave 5G 蜂窝网络中的户外城市蜂窝网络场景下对所提算法进行验证,其路径损耗值基于参考文献[5],本文考虑单小区场景,蜂窝用户和 D2D 用户随机分布在此小区中,在此场景下利用 MATLAB 进行仿真,主要的仿真参数见表 1。

4.2 仿真结果

在仿真中将本文所提算法和参考文献[12]中的

表 1 主要仿真参数

参数	参数值
小区半径/m	500 m
RB 带宽	12×15 kHz= 180 kHz
所有用户到基站的距离	≥35 m
蜂窝用户数	20
D2D 的距离	10 m
蜂窝用户最大发射功率	23 dBm
D2D 用户最大发射功率	10 dBm
蜂窝用户 SINR 阈值 r_c^{th}	0
D2D 用户 SINR 阈值 r_d^{th}	0
噪声功率密度	-174 dBm/Hz
路径损耗 LOS (μ, α, σ)	(61.4, 2, 5.8 dB)
路径损耗 NLOS (μ, α, σ)	(72, 2.92, 8.7 dB)
莱斯信道 K 参数	5

启发式算法和随机分配算法相比较。启发式算法^[12]是在满足 SINR 的条件下每个 D2D 用户选择使总的速率达到最大的蜂窝用户资源进行复用,随机分配算法则是 D2D 用户随机复用一个蜂窝用户资源,不考虑其他因素。图 4 中描述了当 D2D 用户距离 distance=10 时 D2D 对的数量 (d2d_num) 和系统总吞吐量之间的关系曲线。从图 4 中可以看出,随着 D2D 用户数量的增加,系统总的吞吐量也在增加。并且本文所提算法的增长幅度大于参考算法,这是因为本文所提算法为蜂窝用户选择最佳的 D2D 用户进行复用。因此本文所提算法的性能优于其他参考算法。

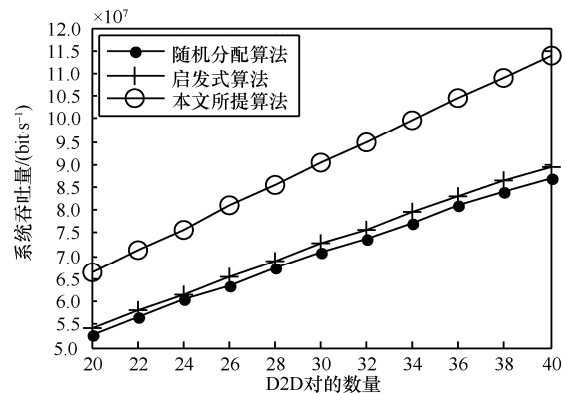


图 4 d2d_num 和系统总吞吐量的关系

图5描述的是当 $d2d_num=30$ 时系统总吞吐量和 D2D 用户距离 (distance) 之间的关系曲线。从图5中能够看出, 系统总的吞吐量随着 distance 的增大而逐渐减少, 并且减少的程度越来越小, 最后则会趋于稳定。在 $distance=30$ m 之前, 系统总吞吐量随着 distance 的增大变化较大, 而在 $distance=30$ m 系统总吞吐量随着 distance 的增大则变化越来越小。其原因是在 distance 较小时, D2D 发射机到接收机这条链路的路径损耗较小, 因而其链路质量就较好, 故系统总吞吐量的受其影响较大, 而在 distance 较大时, 其路径损耗较大, 导致 D2D 链路质量会变得较差, 故系统吞吐量受其影响微乎其微。此外, 从图5可以看出, 所提算法的性能要明显好于对比算法。

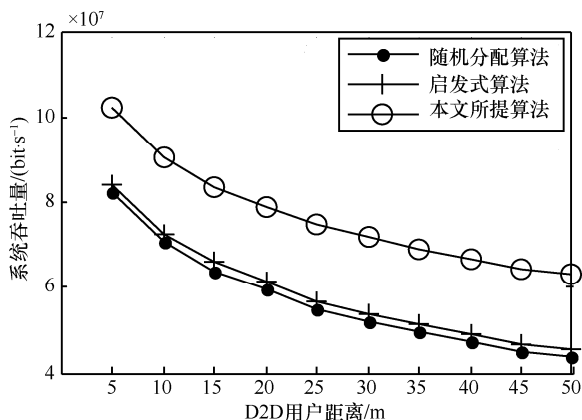


图5 distance 和系统吞吐量之间的关系

图6描述的是当 $d2d_num=30$ 、 $distance=10$ m 时系统吞吐量随 D2D 发射功率的变化趋势。从图6中可以看出, 随着 D2D 发射功率的增大, 吞吐量的增长越来越缓慢, 这是由于 D2D 发射功率越大, 其对基站的干扰就越大, 对使用相同资源块的蜂窝链路的影响也就越大, 因此系统吞吐量的增长趋势趋于平缓。所以为了系统性能得到好的提升, 对 D2D 发射功率进行功率控制是有必要的。从图6中还可以看出, 所提算法优于其他方案。

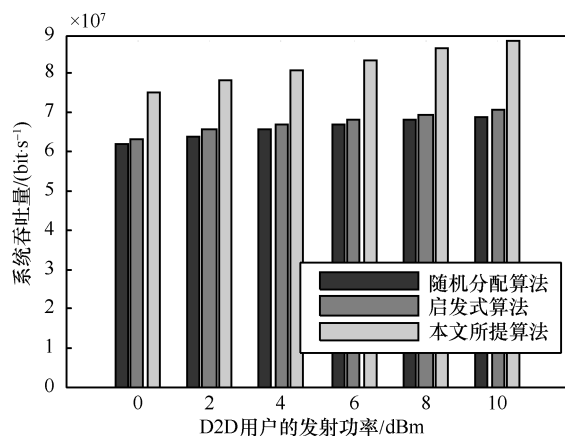
图6 P_{d2d} 和系统总吞吐量的关系

图7描述的是当 $d2d_num=30$ 、 $distance=10$ m 时系统吞吐量的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF)。从图7中可以看出, 引入 D2D 通信后, 通过采用合理的资源分配方法可以有效地提高系统总的吞吐量。并且所提算法通过最大化吞吐量增量值得最佳的匹配组合, 因而能够为蜂窝用户选择最合适的 D2D 用户进行资源共享, 因此相较其他算法, 可以使系统获得更高的吞吐量, 并可以进一步说明所提算法的有效性。

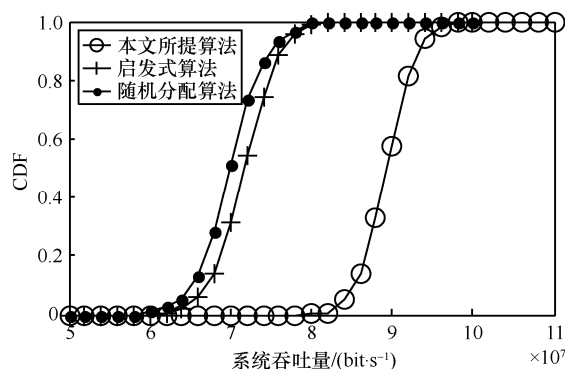


图7 系统吞吐量的 CDF

5 结束语

在 5G 网络中单小区户外毫米波场景中研究 D2D 通信, 为了最大化系统总的吞吐量, 提出一种资源分配方法。首先, 利用线性相关方法找出 D2D 用户可复用的蜂窝用户集合; 其次, 对 D2D



用户进行功率控制选择出其最佳的发射功率；最后提出一种基于二部图匹配算法为D2D用户分配资源，以便为蜂窝用户选择最合适的D2D用户进行资源共享。仿真结果表明，所提算法可以有效提高系统容量，同时保证蜂窝用户和D2D用户的服务质量。但该算法并未考虑多邻小区的干扰，因此可在此基础上对多小区做进一步的研究。

参考文献:

- [1] RAPPAPORT T S, HEATH R W, DANIELS R C, et al. Millimeter wave wireless communications[M]. Englewood: Prentice Hall, 2015.
- [2] 方箭, 李景春, 黄标, 等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 111-118.
FNAG J, LI J C, HUANG B, et al. Review and prospect on the research of 5G spectrum [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 111-118.
- [3] HUANG K C, WANG Z, Millimeter wave communication systems[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011: 29.
- [4] AGI WAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [5] 3GPP. 3rd generation partnership project, Technical specification group radio access networks; LTE device to device proximity services; User equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12): TR36.877 V0.0.4[S]. 2014.
- [6] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [7] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014(2): 114-119.
WANG J Y, GONG Z S, FU J L, et al. Summary of D2D communication technology[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014(2): 114-119.
- [8] SHEN X. Device-to-device communication in 5G cellular networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(2): 2-3.
- [9] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86-92.
- [10] 胡靖, 郑武. D2D 通信蜂窝网络中的比例公平与加权和速率最大化[J]. 计算机应用, 2017, 37(5): 1321-1325.
HU J, ZHENG W. Proportional fairness and weighted sum rate maximization in D2D communication cellular networks[J]. Journal of Computer Application, 2017, 37(5): 1321-1325.
- [11] ZULHASNINE M, HUANG C, SRINIVASAN A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]//Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Oct 11-13, 2010, Niagara Falls, ON, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2010: 368-375.
- [12] GUIZANI Z, HAMDI N. mmwave E-band D2D communications for 5G-underlay networks: Effect of power allocation on d2d and cellular users throughputs[C]//Computers and Communication (ISCC), June 27-30, 2016, Messina, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2016: 114-118.
- [13] GIORDANI M, MEZZAVILLA M, RANGAN S, et al. Multi-connectivity in 5G mmWave cellular networks[C]//Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), June 20-22, 2016, Vilanova i la Geltru, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [14] NIU Y, SU L, GAO C, et al. Exploiting device-to-device communications to enhance spatial reuse for popular content downloading in directional mmWave small cells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 5538-5550.
- [15] AKDENIZ M R, LIU Y, SAMIMI M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1164-1179.
- [16] AKDENIZ M R, LIU Y, RANGAN S, et al. Millimeter wave picocellular system evaluation for urban deployments[C]//Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec 9-13, 2013, Atlanta, GA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 105-110.
- [17] HUYNH T, ONUMA T, KURODA K, et al. Joint downlink and uplink interference management for device to device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Access, 2016(4): 4420-4430.
- [18] KUHA H W. Variants of the Hungarian method for assignment problems[J]. Naval Research Logistics (NRL), 1956, 3(4): 253-258.

作者简介



易冰 (1963—), 男, 重庆信科设计有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信新技术研究及应用。

陈永丽 (1992—), 女, 重庆邮电大学通信新技术应用研究中心硕士生, 主要研究方向为移动通信新技术研究及应用。

赵瑞雪 (1993—), 女, 重庆邮电大学通信新技术应用研究中心硕士生, 主要研究方向为移动通信新技术研究及应用。