

基于加权二部图与干扰聚类的D2D通信上下行联合资源分配

申滨^{1,2}, 元文军^{1,2}, 李旋^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 设备对设备 (D2D, device-to-device) 通信是一种能够有效提高蜂窝网络频谱效率的短距离通信技术。联合考虑上下行子信道全频域资源复用, 针对蜂窝网络中“多对多”的复杂情况 (即一个子信道可以分配给多对 D2D 用户设备 (DUE, D2D user equipment), 一对 DUE 也可以同时使用多个子信道), 提出了一种两阶段子信道和功率联合分配方案。第一阶段, 提出基于加权二部图匹配的资源分配 (WBGm-RA, weighted bipartite graph matching-based resource allocation) 算法, 将系统中的全部子信道分配给所有蜂窝用户设备 (CUE, cellular user equipment), 以最大化 CUE 和速率。第二阶段, 提出基于干扰聚类的资源分配 (IC-RA, interference clustering-based resource allocation) 算法, 根据共享同一子信道的 UE 之间的干扰关系构建干扰矩阵, 在确保 DUE 不会对 CUE 造成严重干扰的情况下, 将分配给 CUE 的资源再次分配给 DUE, 同时调整 DUE 的发射功率, 以最大化系统和速率。该方案形成的新型的上下行信道联合资源分配与多对多信道复用机制, 使得 DUE 的频谱接入机会与网络的总体频谱效率均大幅度提高。仿真结果表明, 与现有典型算法相比, 该算法可以有效地提高系统和速率, 增加系统中通信链路数量并提高 DUE 接入率。

关键词: 蜂窝网络; 设备对设备通信; 上下行资源共享; 信道分配; 功率分配

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00383

Joint uplink and downlink resource allocation for D2D communication based on weighted bipartite graph matching and interference clustering

SHEN Bin^{1,2}, YUAN Wenjun^{1,2}, LI Xuan^{1,2}

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China

Abstract: Device-to-device (D2D) communication is a short-range communication technology that can effectively improve the spectral efficiency of cellular networks. A two-stage subchannel and power joint allocation scheme was proposed to address the complex scenario of “many-to-many” communication in cellular networks (one subchannel could be assigned to multiple pairs of D2D user equipment (DUE), and one pair of DUE could also use multiple subchannels at the same time), considering the full frequency domain resource reuse in both uplink and downlink subchannels. In the first stage, a weighted bipartite graph matching-based resource allocation (WBGm-RA) algorithm was introduced. This algorithm allocated all subchannels to all cellular user equipment (CUE) to maximize CUE sum rate. In the second stage, an interference clustering-based resource allocation (IC-RA) algorithm was proposed, and the interference matrix was constructed according to the interference relations among UE sharing the same subchannel. Resources allocated to CUE were reallocated to DUE. Moreover, the transmit power of DUE was optimized to maximize the system sum rate while ensured that DUE did not cause serious interference to CUE. This study established a novel joint resource allocation for uplink

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-04-25

通信作者: 申滨, shenbin@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62371082)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 62371082)

and downlink subchannels, coupled with a mechanism for “many-to-many” channel reuse. This led to a substantial increase in spectrum access opportunities for DUE and overall spectrum efficiency in the network. Simulation results show that compared with the existing typical algorithm, this algorithm can effectively improve the system sum rate, increase the number of communication links in the system and increase the DUE access rate.

Key words: cellular network, device-to-device communication, uplink-downlink resource sharing, channel allocation, power allocation

0 引言

随着物联网、自动驾驶、人工智能等科技的发展,网络中无线智能接入设备的数量与日俱增,数据流量呈爆炸式增长,使得频谱资源稀缺日益严重。更高数据速率、更低能耗、更低时延、更大覆盖范围和高效频谱共享的需求对传统无线通信提出了巨大挑战。在此趋势下,设备对设备(D2D, device-to-device)通信技术引起了业界的广泛关注^[1-3]。

传统的蜂窝网络架构以基站(BS, base station)为中心,所有通信链路都需要由BS建立并维护,通常会有BS业务已经饱和和过载而网络频谱利用率却仍然较低的短板,难以应对5G时代超高流量密度和超高连接数需求的挑战。在此基础上,5G系统引入D2D通信技术,作为传统蜂窝通信的补充机制,通过D2D链路复用蜂窝用户设备(CUE, cellular user equipment)频谱资源,D2D用户设备(DUE, D2D user equipment)不再迂回BS建立数据传输路径,而在DUE对之间直接传输数据,提高了资源利用率,降低了BS负荷,增加了网络中的通信链路数量。此外,作为短距离、端到端的数据传输方式,D2D通信还可以在获得更高信道增益的同时大大降低传输时延。由于D2D通信能够极大地弥补现有蜂窝网络的短板,被视为下一代移动通信的关键技术之一。然而,D2D通信在带来诸多优势的同时,也给网络中的资源管理带来了困难。DUE与CUE共享资源时彼此之间会产生干扰,影响系统性能。因此,设计合理有效的资源管理方案才能充分发挥D2D通信的优势^[4-9]。

近年来,对蜂窝网络中的D2D通信资源分配研究工作较多,主要分为如下两类。

第一类是上行链路中的D2D通信资源分配,在这种情况下,只允许DUE使用上行链路进行通信。针对DUE采用“一对一”复用方式即一个CUE占用的信道只能由一对DUE复用,且一对

DUE也只能复用一个CUE占用的信道^[10],文献[11-12]给出了解决方案。文献[11]提出了一种集成的协同分布式资源分配算法,解决了异构网络中D2D通信的联合子信道和功率分配问题,该算法对网络吞吐量增加较为有限。文献[12]提出了一种基于最大容量增益的D2D资源分配方法,该方法首先利用几何规划算法调节UE的功率以减少网络中的干扰,然后利用匈牙利算法实现频谱资源与DUE的最佳匹配,但该方法对系统传输速率提升较少。针对DUE采用“多对一”复用方式即一个CUE占用的信道可以被多对DUE复用,而一对DUE只能复用一个CUE占用的信道^[13],文献[14-15]给出了解决方案。文献[14]针对无线携能蜂窝网络中D2D通信功率分配问题,提出了集中式和分布式两种方案,具有轻量化和节能的优点。文献[15]研究了一种基于功率控制的新鲸鱼资源分配方法,该方法通过改进线性收敛因子和引入自适应惯性权重因子,解决了传统算法收敛精度低、容易陷入局部寻优的缺点,提高了系统吞吐量。但是两种因子对于参数的选择比较敏感,参数调整不当会影响算法性能,且文献[14-15]均未考虑信道分配。文献[10-15]中,DUE采用“一对一”和“多对一”方式复用信道,频谱利用率仍有提高的空间。在此背景下,一些研究者开始关注“多对多”信道复用方式即一个CUE占用的信道可以同时由多对DUE复用,且一对DUE可以同时复用多个CUE占用的信道^[16]。文献[17]关注底层多播D2D通信,提出了分布式资源分配方案,解决了联合信道和功率分配问题,在保证UE服务质量(QoS, quality of service)的前提下最大化系统吞吐量。该方案不需要中央控制器,可适应网络拓扑变换,但会增加通信开销和能源消耗。文献[18]针对密集场景下的D2D通信资源分配,提出了一种可扩展的资源共享框架,并设计了合理有效的资源管理方案,提高了系统的吞吐量和用户访问率。文献[19]提出了一种多对DUE之间通过复用多

个信道来实现频谱资源共享的博弈论方案。针对上述方案只解决DUE资源分配而默认CUE资源分配已完成的情况，文献[20]同时考虑CUE和DUE的资源分配，提出了基于加权二部图和贪婪策略的资源分配算法，该算法复杂度较低，可以快速找到最优解。

第二类是下行链路中的D2D通信资源分配，即DUE只占用下行链路传输信息。文献[21]研究了异构蜂窝网络支持的D2D通信信道和功率分配问题，采用最大顺序搜索为DUE分配资源块，遗传优化算法优化DUE和BS的发射功率，提高了能量效率。文献[22]将底层D2D网络联合资源块和功率分配问题表述为一个博弈问题，并提出了一种分布式学习算法，以确定时变无线电环境下的解决方案，但该算法复杂度较高。文献[23]采用“多对多”复用方式，设计了D2D资源分配和功率控制框架，该框架依据图着色原理，将UE进行初步分组，通过更换和增加组内成员来提高UE的信号质量。尽管该框架在增加通信链路数量和确保UE公平性方面取得了良好的效果，但如何选择合适的信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)阈值来确保UE的QoS是一个难题。文献[24]将D2D和蜂窝通信链路之间的干扰关系建模为干扰图，提出了基于干扰图的资源分配算法，可以有效地提高系统吞吐量，但未考虑UE的QoS和公平性。

综上所述，文献[10-24]只考虑了依靠上行链路或者下行链路的D2D通信，无线频谱资源的复用维度仅局限于单侧可用资源。考虑这一点，业界对蜂窝网络中联合上行和下行信道的D2D资源分配问题进行了研究。文献[25]将资源分配问题分解为两个子问题，将功率分配问题表述为非线性规划问题，在有限集中寻找最优解，之后采用最大权值二部图匹配算法，为每个DUE选择最佳子载波。该方案在保证UE的QoS的同时提高了系统和速率，但网络规模扩大时DUE的最优功率获取耗时较长。文献[26]同时考虑CUE和DUE的资源分配，提出了基于图着色的资源共享方案，优化了网络性能。但是全双工技术引入的自干扰对系统性能会产生较大影响，且自干扰消除机制亦增加了用户侧的实现负担。文献[27]默认CUE的信道分配已经完成，只考虑DUE的资源分配，利用顺序几何规划方法，提高了系统和速率。文献[28]提出了一种基

于外部性匹配理论的资源配置框架，通过最小化公共信道蜂窝和D2D通信之间的干扰来最大化网络吞吐量。

针对文献[10-28]的思路和解决方案存在的问题，本文的目标是扩大频谱复用维度，并提出相应的资源分配算法，以进一步提高系统性能。本文旨在研究所有可用的蜂窝链路（无论是上行链路，还是下行链路）上同时找到联合信道分配和功率优化的最佳解决方案。此外，已有的大多数研究出于高度简化问题的目的而假设CUE信道分配已经理想完成，本文则将该任务视为DUE资源分配的前提条件并给出了该前提条件的解决方案。由于本文考虑的网络场景比只处理DUE的信道分配或功率优化要复杂得多，因此信道分配和功率优化的联合任务变得更具难度。

首先，本文将上行和下行信道聚合为可分配资源，以扩大可用资源空间。其次，采用“多对多”的信道共享机制，允许所有UE（包括CUE和DUE）获取尽可能多的信道，以满足其在网络中的带宽需求。基于丰富的双链路资源和复杂且频谱效率更高的多对多机制，核心目标是在保证所有用户基本速率需求的同时最大化系统和速率，并增加网络中所支持的通信链路的数量，提高DUE接入率。最后，将资源分配问题建模为加权二部图匹配和干扰聚类辅助方案，对CUE和DUE分别进行相应的信道分配。仿真结果表明，与现有的几种方案对比，所提方案在提高系统和速率、增加通信链路数量和提高DUE接入率方面性能优越。本文研究工作与部分已有方案分析对比见表1。

1 系统模型和优化问题数学模型

1.1 系统模型

系统模型如图1所示。考虑单蜂窝小区，小区中包含一个BS、 N 个CUE、 M 个DUE对和 K 个正交子信道（包括 S 个正交上行子信道和 X 个正交下行子信道， $K = S + X$ ）。 $\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 表示CUE集合，其中， C_n 表示第 n 个CUE。 $\mathcal{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}$ 表示DUE集合，其中， D_m 表示第 m 个DUE对， $D_{m,t}$ 和 $D_{m,r}$ 分别表示 D_m 的发射机与接收机。 $\mathcal{K} = \{k_{1,u}, k_{2,u}, \dots, k_{s,u}, \dots, k_{s,u}, k_{1,d}, k_{2,d}, \dots, k_{x,d}, \dots, k_{x,d}\}$ 表示正交子信道集合，其中， $k_{s,u}$ 表示第 s 个正交上行子信道， $k_{x,d}$ 表示第 x 个正交下行子信道。另外， $\mathcal{N} =$

表1 本文研究工作与部分已有方案分析对比

通信资源	信道复用	文献	问题建模	通信模式	CSI条件	优化目标	解决方案		
上行频段	一对一	[11]	信道+功率分配	复用模式	完全	最大化网络吞吐量	启发式算法		
		[12]	信道+功率分配	复用模式	完全	最大化系统传输速率	匈牙利算法		
	多对一	[14]	功率分配	复用模式	完全	最大化社会效益	博弈论		
		[15]	功率分配	复用模式	完全	最大化系统吞吐量	改进鲸鱼优化算法		
	多对多	[17]	信道+功率分配	复用模式	部分	保证UE最小速率 最大化网络吞吐量	分数规划 参数凸松弛		
		[18]	信道+功率分配	复用模式	部分	提高系统吞吐量 用户访问率	集合划分 二次变换		
		[19]	信道+功率分配	专用模式	完全	最大化DUE和速率	博弈论		
		[20]	信道分配	复用模式	完全	最大化系统和速率 提高UE公平性	加权二部图 贪婪策略		
		下行频段	一对一	[21]	信道+功率分配	复用模式	完全	最大化DUE能量效率	遗传算法
				[22]	信道+功率分配	复用模式	无	提高系统和速率	博弈论
多对多	[23]	信道+功率分配	专用+复用	完全	最大化链路数量,提高UE公平性	图着色			
	[24]	信道+功率分配	复用模式	完全	提高系统吞吐量	干扰图			
上下行全频段	一对一	[25]	信道+功率分配	复用模式	完全	保证UE的QoS,最大化系统和速率	二部图匹配		
		[26]	信道+功率分配	复用+全双工	完全	最大化系统和速率	图着色		
多对一	[27]	信道+功率分配	复用模式	完全	保证UE的QoS,最大化网络吞吐量	顺序几何规划			
	[28]	信道+功率分配	复用模式	部分	最大化网络总吞吐量	匹配理论			
	本文	信道+功率分配	复用模式	完全	保证UE基本速率需求,最大化系统和速率,增加接入的通信链路数量	加权二部图 干扰聚类			

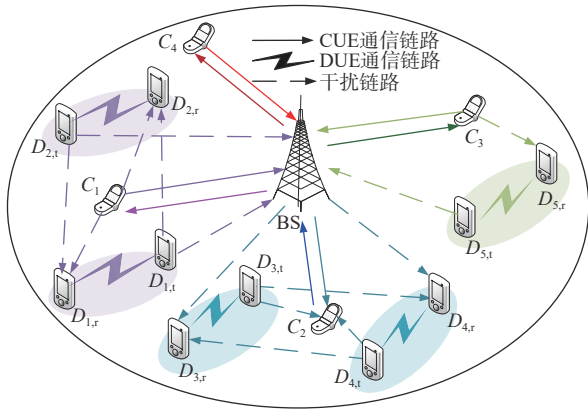


图1 系统模型

$\{1, 2, \dots, N\}$ 、 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 、 $\mathcal{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ 和 $\mathcal{X} = \{1, 2, \dots, X\}$ 分别表示CUE、DUE、上行子信道和下行子信道索引集合。

为表示子信道分配结果,定义 $\mathbf{F}_C^u = [\pi_{s,n}]_{N \times S}$ 、 $\mathbf{F}_C^d = [\pi_{x,n}]_{N \times X}$ 、 $\mathbf{F}_D^u = [\pi_{s,m}]_{M \times S}$ 和 $\mathbf{F}_D^d = [\pi_{x,m}]_{M \times X}$ 分别为CUE上行子信道分配矩阵、CUE下行子信道分配矩阵、DUE上行子信道分配矩阵和DUE下行子信道分配矩阵,其中, $\pi_{s,n}$ 、 $\pi_{x,n}$ 、 $\pi_{s,m}$ 和 $\pi_{x,m}$ 分别表示子信道分配的二进制变量。当上行子信道 $k_{s,u}$ 分配给 C_n 时, $\pi_{s,n} = 1$, 否则 $\pi_{s,n} = 0$; 当下行子信道

$k_{x,d}$ 分配给 C_n 时, $\pi_{x,n} = 1$, 否则 $\pi_{x,n} = 0$; 当上行子信道 $k_{s,u}$ 分配给 D_m 时, $\pi_{s,m} = 1$, 否则 $\pi_{s,m} = 0$; 当下行子信道 $k_{x,d}$ 分配给 D_m 时, $\pi_{x,m} = 1$, 否则 $\pi_{x,m} = 0$ 。另外, 定义 $\mathbf{P}_C^u = [p_n^s]_{N \times S}$ 、 $\mathbf{P}_C^d = [p_n^x]_{N \times X}$ 、 $\mathbf{P}_D^u = [p_m^s]_{M \times S}$ 和 $\mathbf{P}_D^d = [p_m^x]_{M \times X}$ 为相应的功率分配矩阵,其中, p_n^s 、 p_n^x 、 p_m^s 和 p_m^x 分别表示 C_n 在子信道 $k_{s,u}$ 上的发射功率、BS在子信道 $k_{x,d}$ 上的发射功率、 D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上的发射功率。

参考文献[20, 23, 25, 27], 假设网络中所有的通信链路和干扰链路不仅经历了大尺度衰落(包括阴影和路径损耗), 还经历了由多径传播引起的小尺度衰落。根据上述假设, 将 C_n 到BS在子信道 $k_{s,u}$ 上的瞬时信道增益建模为

$$g_{n,B}^s = \delta \zeta_{n,B}^s \beta_{n,B}^s \lambda_{n,B}^{-\alpha} \quad (1)$$

其中, δ 是路径损耗常数, α 是路径损耗指数, $\zeta_{n,B}^s$ 表示服从对数正态分布的大尺度衰落增益, $\beta_{n,B}^s$ 表示服从指数分布的小尺度衰落增益, $\lambda_{n,B}$ 表示 C_n 和BS之间的距离。同时定义 $g_{m,t,m,r}^s$ 、 $g_{n,m,r}^s$ 、 $g_{m,t,B}^s$ 和 $g_{m,t,m',r}^s$ 分别为 D_m 到 $D_{m,r}$ 、 C_n 到 $D_{m,r}$ 、 D_m 到BS、 D_m 到与其共享相同子信道的 $D_{m'}$ 接收机 $D_{m',r}$ 在上行子信道 $k_{s,u}$ 上的瞬时信道增益; 定义 $g_{B,n}^x$ 、 $g_{m,t,m,r}^x$ 、 $g_{B,m,r}^x$ 和 $g_{m,t,n}^x$

和 $g_{m,t,m',r}^x$ 分别为BS到 C_n 、 $D_{m,t}$ 到 $D_{m,r}$ 、BS到 $D_{m,r}$ 、 $D_{m,t}$ 到 C_n 和 $D_{m,t}$ 到与其共享相同子信道的 $D_{m'}$ 接收端 $D_{m',r}$ 在下行子信道 $k_{x,d}$ 上的瞬时信道增益。

系统中不同通信链路之间的干扰关系可总结为

$$D_{m,t} \rightarrow \text{BS}: I_{m,B}^s = p_m^s g_{m,t,B}^s \quad (2)$$

$$\text{BS} \rightarrow D_{m,r}: I_{B,m}^x = p_B^x g_{B,m,r}^x \quad (3)$$

$$C_n \rightarrow D_{m,r}: I_{n,m}^s = p_n^s g_{n,m,r}^s \quad (4)$$

$$D_{m,t} \rightarrow C_n: I_{m,n}^x = p_m^x g_{m,t,n}^x \quad (5)$$

$$D_{m,t} \rightarrow D_{m',r}: I_{m,m'}^{s/x} = p_m^{s/x} g_{m,t,m',r}^{s/x} \quad (6)$$

其中,式(2)表示子信道 $k_{s,u}$ 上用户 D_m 发射机 $D_{m,t}$ 对BS的干扰,式(3)表示子信道 $k_{x,d}$ 上BS对用户 D_m 接收机 $D_{m,r}$ 的干扰,式(4)表示子信道 $k_{s,u}$ 上用户 C_n 对用户 D_m 接收机 $D_{m,r}$ 的干扰,式(5)表示子信道 $k_{x,d}$ 上用户 D_m 发射机 $D_{m,t}$ 对用户 C_n 的干扰,式(6)表示子信道 $k_{s,u}$ 或 $k_{x,d}$ 上用户 D_m 发射机 $D_{m,t}$ 对与其共享相同子信道的用户 $D_{m'}$ 接收机 $D_{m',r}$ 的干扰。

参考文献[20, 24]可得, C_n 使用上行子信道 $k_{s,u}$ 和下行子信道 $k_{x,d}$ 通信时,接收端BS和 C_n 处的SINR分别为

$$\gamma_n^s = \frac{\pi_{s,n} P_n^s g_{n,B}^s}{\sigma^2 + \sum_{m=1}^M \pi_{s,m} I_{m,B}^s} \quad (7)$$

$$\gamma_n^x = \frac{\pi_{x,n} P_B^x g_{B,n}^x}{\sigma^2 + \sum_{m=1}^M \pi_{x,m} I_{m,n}^x} \quad (8)$$

其中, σ^2 为单位带宽内的加性高斯白噪声功率。

参考文献[20, 24]可得, D_m 使用上行子信道 $k_{s,u}$ 和下行子信道 $k_{x,d}$ 通信时,接收端 $D_{m,r}$ 处的SINR分别为

$$\gamma_m^s = \frac{\pi_{s,m} P_m^s g_{m,t,m,r}^s}{\sigma^2 + \sum_{n=1}^N \pi_{s,n} I_{n,m}^s + \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \pi_{s,m'} I_{m',m}^s} \quad (9)$$

$$\gamma_m^x = \frac{\pi_{x,m} P_m^x g_{m,t,m,r}^x}{\sigma^2 + \sum_{n=1}^N \pi_{x,n} I_{B,m}^x + \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \pi_{x,m'} I_{m',m}^x} \quad (10)$$

其中, $I_{m',m}^s$ 和 $I_{m',m}^x$ 分别为 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上对 D_m 的干扰。

根据香农公式, C_n 和 D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上可以实现的带宽归一化数据速率分别为

$$R_n^s = \text{lb}(1 + \gamma_n^s) \quad (11)$$

$$R_n^x = \text{lb}(1 + \gamma_n^x) \quad (12)$$

$$R_m^s = \text{lb}(1 + \gamma_m^s) \quad (13)$$

$$R_m^x = \text{lb}(1 + \gamma_m^x) \quad (14)$$

整个系统的和速率表示为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S R_n^s + \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^X R_n^x + \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S R_m^s + \sum_{m=1}^M \sum_{x=1}^X R_m^x \quad (15)$$

1.2 优化问题数学模型

系统和速率表征了通信网络中信息传输的能力。本文的目标是通过联合子信道和功率分配,在满足CUE和DUE基本数据速率需求的同时,最大化系统和速率,增加系统接入的通信链路数量,提高系统的DUE接入率。优化问题的数学模型表示为

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{F_C^u, F_C^d, F_B^u, F_B^d, P_C^s, P_C^x, P_B^s, P_B^d} R_{\text{sum}} \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{n=1}^N \pi_{s,n} \leq 1, \sum_{n=1}^N \pi_{x,n} \leq 1 \\ \text{C2: } & \sum_{s=1}^S \pi_{s,n} \geq 0, \sum_{x=1}^X \pi_{x,n} \geq 0 \\ \text{C3: } & \sum_{m=1}^M \pi_{s,m} \geq 0, \sum_{m=1}^M \pi_{x,m} \geq 0 \\ \text{C4: } & \sum_{s=1}^S \pi_{s,m} \geq 0, \sum_{x=1}^X \pi_{x,m} \geq 0 \\ \text{C5: } & R_n^{s/x} \geq R_n^{\text{th}}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S}, x \in \mathcal{X} \\ \text{C6: } & R_m^{s/x} \geq R_m^{\text{th}}, \forall m \in \mathcal{M}, s \in \mathcal{S}, x \in \mathcal{X} \\ \text{C7: } & 0 \leq p_n^s \leq p_n^{\text{max}}, \forall n \in \mathcal{N}, s \in \mathcal{S} \\ \text{C8: } & 0 \leq p_B^x \leq p_B^{\text{max}}, \forall n \in \mathcal{N}, x \in \mathcal{X} \\ \text{C9: } & 0 \leq p_m^{s/x} \leq p_m^{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}, s \in \mathcal{S}, x \in \mathcal{X} \end{aligned} \quad (16)$$

其中,约束条件C1和C2是CUE的子信道分配约束,约束条件C1表示不同CUE不能共享相同的子信道,约束条件C2表示每个CUE可以使用多个子信道;约束条件C3和C4是DUE的子信道分配约束,约束条件C3表示不同DUE可以共享相同的子信道,约束条件C4表示每对DUE可以同时使用多个子信道;约束条件C5和C6是UE的速率需求约束,其中, R_n^{th} 和 R_m^{th} 分别为CUE和DUE的基本速率需求;约束条件C7、C8和C9是功率约束,其中, p_n^{max} 、 p_B^{max} 和 p_m^{max} 分别为 C_n 、BS和 D_m 在子信道上的最大发射功率。

子信道分配的二进制变量 $\pi_{s,n}$ 、 $\pi_{x,n}$ 、 $\pi_{s,m}$ 和 $\pi_{x,m}$ 以及功率分配的连续变量 p_n^s 、 p_B^x 、 p_m^s 和 p_m^x 的存在,使得优化问题式(16)是一个非凸混合整数非线性规划(MINLP, mixed integer non-linear programming)问题,这类问题通常是非确定性多项式(NP, non-deterministic polynomial)-hard的。这意味着不存在已知的多项式时间算法可用来寻找所有可行子信道

和功率分配矩阵。搜索空间中可能组合的数量随着 UE 数量的增加呈指数增长，因此，暴力搜索算法在计算上是不可行的。

2 上下行联合资源分配方案

蜂窝网络中 D2D 通信资源分配问题已被广泛研究，但仍存在一些问题。首先，多数研究工作仅局限于考虑上行链路或者下行链路资源可供共享复用。其次，在信道复用方面，“一对一”和“多对一”复用方式更为业界所广泛关注，而“多对多”方式因其复杂性还较为欠缺相关研究。另外，多数研究在场景较为复杂时只考虑单一的信道分配或者功率分配。基于以上 3 个问题，针对现实中更加复杂的用户共存场景，本文考虑了 DUE 同时使用上行与下行信道，在“多对多”复用方式下的联合信道与功率分配问题。所提基于加权二部图匹配和干扰聚类的资源分配算法能够以较低复杂度获得优化问题式(16)的次优解。本文考虑集中式资源分配方案，假设 BS 可以通过定期发送和接收来自其他通信节点的数据获得每条通信链路的信道增益和不同通信链路之间干扰的关系，即 BS 具有全局信道状态信息 (CSI, channel state information)。

2.1 蜂窝用户资源分配

由于 D2D 通信是对蜂窝通信频谱效率实现增强的通信机制，DUE 必须在不影响 CUE 或者在 CUE 可接受的干扰限度的基础上对 CUE 的频谱资源进行复用。DUE 的频谱复用相对于 CUE 的频谱分配而言是低优先级的，所以 DUE 的频谱复用一般是建立在 CUE 的频谱分配基础之上的。因此，本文在解决资源分配时考虑 CUE 对资源使用具有更高的优先级，将资源分配问题分解为 CUE 资源分配和 DUE 资源重用这两个先后阶段^[29]。本节解决 CUE 的资源分配问题，先不考虑 DUE 的资源分配。将 CUE 资源分配构建为加权完全二部图匹配问题。CUE 占用不同正交子信道，彼此之间互不影响，为了最大化该阶段的系统和速率，将 CUE 上行和下行通信链路的发射机功率设置为可达功率的最大值，即 $p_n^s = p_n^{\max}$ ， $p_B^x = p_B^{\max}$ 。

首先构造与系统结构相对应的加权二部图 $G = (Z, Y, E, W)$ ， $Z \cap Y = \emptyset$ 。其中， $Z = \mathcal{C}$ 表示用左顶点集 Z 中的顶点代表系统中的 CUE； $Y = \mathcal{K}$ 表示用右顶点集 Y 中的顶点代表系统中的子信道； E

表示边集合，此时 $E = \{e_{ns}, e_{nx} | e_{ns} = \{C_n, k_{s,u}\}, e_{nx} = \{C_n, k_{x,d}\}, C_n \in \mathcal{C}, k_{s,u} \in \mathcal{K}, k_{x,d} \in \mathcal{K}, C_n \leftrightarrow k_{s,u}, C_n \leftrightarrow k_{x,d}, C_n \leftrightarrow k_{s,u}$ 表示左顶点 C_n 与右顶点 $k_{s,u}$ 相连， $C_n \leftrightarrow k_{x,d}$ 含义类似； $W_u = [w_{ns}]_{N \times S}$ 和 $W_d = [w_{nx}]_{N \times X}$ 是权重矩阵， w_{ns} 和 w_{nx} 分别为边 e_{ns} 和 e_{nx} 的权重值，物理含义为 C_n 在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上的数据速率。权重值 w_{ns} 和 w_{nx} 分别计算为

$$w_{ns} = \text{lb} \left(1 + \frac{p_n^{\max} g_{n,B}^s}{\sigma^2} \right) \quad (17)$$

$$w_{nx} = \text{lb} \left(1 + \frac{p_B^{\max} g_{B,n}^x}{\sigma^2} \right) \quad (18)$$

求解 CUE 子信道分配矩阵 F_c^u 和 F_c^d 的问题可等价为在图 G 中寻找最大加权完美匹配 A_u 和 A_d 。对于图 G 的一个匹配，令该匹配的权值为其包含边的权重之和，且匹配的权值大于或等于该图其他任何匹配的权值，即该图的最大加权匹配。以此为基础，为顶点较少的集合添加虚拟顶点使得 $|Z| = |Y| = T$ ，令左右顶点集合中顶点个数相等，便可获得图 G 的最大加权完美匹配 A_u 和 A_d 。而与虚拟顶点相连的边，其权重值设为 0，权重矩阵更新为 $W_u^* = [w_{ns}^*]_{T \times T}$ 和 $W_d^* = [w_{nx}^*]_{T \times T}$ 。权重值更新为

$$w_{ns}^* = \begin{cases} 0, & C_n \text{ 或 } k_{s,u} \text{ 是虚拟顶点} \\ w_{ns}, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$w_{nx}^* = \begin{cases} 0, & C_n \text{ 或 } k_{x,d} \text{ 是虚拟顶点} \\ w_{nx}, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

CUE 的资源分配问题可以表示为

$$\max \left(\sum_{e_{ns} \in A_u} w_{ns}^* + \sum_{e_{nx} \in A_d} w_{nx}^* \right) \quad (21)$$

该阶段的最大加权完美匹配问题通过 KM (Kuhn-Munkres) 算法^[30-31]解决。使用 KM 算法得到问题式(21)的最大加权完美匹配 A_u 和 A_d ，将与虚拟顶点相关联的边集 $e_{\text{virtual}}^u \subseteq A_u$ 和 $e_{\text{virtual}}^d \subseteq A_d$ 删除得到最终匹配结果 A_u^* 和 A_d^* 。之后，将已经分配给 CUE 的子信道删除，重复以上步骤，直到所有子信道都分配给 CUE。基于加权二部图匹配的资源分配 (WBGMR-RA, weighted bipartite graph matching-based resource allocation) 算法如算法 1 所示。

算法 1 基于加权二部图匹配的资源分配算法 (WBGMR-RA)

输入: \mathcal{C}, \mathcal{K}

输出: F_C^u, F_C^d

1) 参数初始化: $F_C^u = [\pi_{s,n}]_{N \times S}$, $\pi_{n,s} = 0$, $F_C^d = [\pi_{x,n}]_{N \times X}$, $\pi_{n,x} = 0$, $\forall n \in \mathcal{N}$, $\forall s \in \mathcal{S}$, $\forall x \in \mathcal{X}$, $\mathcal{K}_0 = \mathcal{K}$;

2) while $\mathcal{K}_0 \neq \emptyset$ do

3) 依据 CUE 集合 \mathcal{C} 和子信道集合 \mathcal{K}_0 构造加权完全二部图 $G = (Z, Y, E, W)$;

4) 添加虚拟顶点, 令 $|Z| = |Y| = T$;

5) 由式(19)和式(20)计算 W_u^* 和 W_d^* ;

6) 使用 KM 算法求解问题式(21)得到最大加权完美匹配 A_u 和 A_d ;

7) 将 A_u 和 A_d 中与虚拟顶点相关联的边删除得到最终匹配 A_u^* 和 A_d^* , $A_u^* \leftarrow A_u \setminus e_{\text{virtual}}^u$, $A_d^* \leftarrow A_d \setminus e_{\text{virtual}}^d$;

8) for each $e_{ns} \in A_u^*$, $e_{nx} \in A_d^*$ do

9) $\pi_{s,n} = 1$, $\pi_{x,n} = 1$, $\mathcal{K}_0 \leftarrow \mathcal{K}_0 \setminus k_{s,u}$, $\mathcal{K}_0 \leftarrow \mathcal{K}_0 \setminus k_{x,d}$;

10) end for

11) end while

2.2 D2D用户资源分配

第一阶段 CUE 资源分配完成之后, CUE 占用了系统中所有子信道。开始第二阶段 DUE 资源分配, 将系统中所有已经分配给 CUE 的子信道再次分配给 DUE, 进一步提高整个系统和速率并增加系统中接入的通信链路数量。本节将这个问题建模为干扰聚类问题。为了引入提出的基于干扰聚类的资源分配算法, 先给出以下几个定义。

定义 1 UE 集群 H_s 和 H_x , H_s 为共享上行子信道 $k_{s,u}$ 的 UE 集合, H_x 为共享下行子信道 $k_{x,d}$ 的 UE 集合。

定义 2 候选 UE 集群 H_s^* 和 H_x^* , H_s^* 为等待接入上行子信道 $k_{s,u}$ 的候选 DUE 集合, H_x^* 为等待接入下行子信道 $k_{x,d}$ 的候选 DUE 集合。

定义 3 集群和速率 $R(H_s)$ 和 $R(H_x)$, $R(H_s)$ 为 H_s 中所有 UE 速率之和, $R(H_x)$ 为 H_x 中所有 UE 速率之和。 $R(H_s)$ 和 $R(H_x)$ 分别计算为

$$R(H_s) = \sum_{C_n \in H_s} R_n^s + \sum_{D_m \in H_s} R_m^s \quad (22)$$

$$R(H_x) = \sum_{C_n \in H_x} R_n^x + \sum_{D_m \in H_x} R_m^x \quad (23)$$

因此, 系统和速率 R_{sum} 为

$$R_{\text{sum}} = \sum_{s \in \mathcal{S}} R(H_s) + \sum_{x \in \mathcal{X}} R(H_x) \quad (24)$$

定义 4 干扰矩阵 $L_s = [l_{m,m'}^s]_{M \times M}$ 表示共享子信道 $k_{s,u}$ 的 DUE 间的干扰关系, $L_x = [l_{m,m'}^x]_{M \times M}$ 表示共

享子信道 $k_{x,d}$ 的 DUE 间的干扰关系。 $l_{m,m'}^s$ 和 $l_{m,m'}^x$ 分别表示 D_m 对共享子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 的用户 $D_{m'}$ 不可忽略的干扰。若共享同一子信道的两对 DUE 之间的干扰超过阈值, 则这两对 DUE 不能共享该子信道。

为保证系统性能, 实现优化目标, 必须确定 DUE 发射机在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上的发射功率以及 DUE 接收机的最大可容忍干扰阈值。因此, 主要从 3 个方面对 DUE 发射机的发射功率进行约束: 1) 对第一阶段已接入子信道的 CUE 的保障; 2) 对第二阶段中已接入子信道的 DUE 的保障; 3) 对进一步要接入子信道的 DUE 能带来的集群和速率提升的要求。

2.2.1 D2D 用户上行子信道分配

对于 $\forall D_m \in H_s^*$, 要接入已分配给 C_n 的子信道 $k_{s,u}$ 时, D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 上对 C_n 产生的干扰 $I_{m,B}^s$ 应低于 C_n 在子信道 $k_{s,u}$ 上的最大可容忍干扰阈值 $Q_{n,s}$ 。由式(7)和式(16)中约束条件 C5 可得 $Q_{n,s}$ 为

$$Q_{n,s} = \frac{p_n^{\max} g_{n,B}^s}{2^{R_n^s} - 1} - \sigma^2 - \sum_{\forall D_{m'} \in H_s} I_{m',B}^s \quad (25)$$

因此, D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 上的发射功率 p_m^s 应满足

$$p_m^s \leq \frac{Q_{n,s}}{g_{m,B}^s}, \forall D_m \in H_s^*, C_n \in H_s, s \in \mathcal{S} \quad (26)$$

对于 $\forall D_{m'} \in H_s$, 为确保 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{s,u}$ 上的传输质量, 若 D_m 要接入子信道 $k_{s,u}$, 则 D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 上对 $D_{m'}$ 的干扰 $I_{m,m'}^s$ 应低于 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{s,u}$ 上的最大可容忍干扰阈值 $Q_{m',s}$ 。由式(9)和式(16)中约束条件 C6 可得 $Q_{m',s}$ 为

$$Q_{m',s} = \frac{p_{m'}^s g_{m',t}^s}{2^{R_{m'}^s} - 1} - \sum_{C_n \in H_s} I_{n,m'}^s - \sigma^2 - \sum_{D_{m''} \in H_s, D_{m''} \neq D_{m'}} I_{m'',m'}^s \quad (27)$$

因此, p_m^s 还需要满足的条件为

$$p_m^s \leq \frac{Q_{m',s}}{g_{m,m'}^s}, \forall D_m \in H_s^*, D_{m'} \in H_s, s \in \mathcal{S} \quad (28)$$

根据式(16)中约束条件 C9、式(26)和式(28)可得, 对于 $\forall D_m \in H_s^*$, D_m 接入子信道 $k_{s,u}$ 的功率上限值 $p_m^{s,\text{upper}}$ 为

$$p_m^{s,\text{upper}} = \min \left\{ \frac{Q_{n,s}}{g_{m,B}^s}, \frac{Q_{m',s}}{g_{m,m'}^s}, p_m^{\max} \right\} \quad (29)$$

同时, 对于 $\forall D_m \in H_s^*$, 子信道 $k_{s,u}$ 分配给 D_m 后, 为保障 D_m 的传输质量, 从 $D_{m,t}$ 到 $D_{m,t}$ 的接收信号的功率应满足 $p_m^s g_{m,t,m,t}^s \geq p_m^{s,\text{th}}$, 其中, $p_m^{s,\text{th}}$ 为 D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 上的接收功率阈值, 由式(9)和式(16)中

约束条件 C6 可得

$$p_m^{s,\text{th}} = \left(\sigma^2 + \sum_{C_n \in H_s} I_{n,m}^s + \sum_{D_{m'} \in H_s} I_{m',m}^s \right) (2^{R_m^{\text{th}}} - 1) \quad (30)$$

D_m 接入子信道 $k_{s,u}$ 的功率下限值 $p_m^{s,\text{lower}}$ 为

$$p_m^{s,\text{lower}} = \frac{p_m^{s,\text{th}}}{g_{m,t,m,r}^s}, \forall D_m \in H_s^*, C_n \in H_s \quad (31)$$

设置 p_m^s 的初始值为

$$p_m^{s,\text{opt}} = \arg \max_{p_m^{s,\text{lower}} \leq p_m^s \leq p_m^{s,\text{upper}}} R(H_s) \quad (32)$$

UE 集群 H_s 的干扰矩阵 \mathbf{L}_s 可计算为

$$l_{m,m'}^s = \begin{cases} 1, & I_{m,m'}^s > I_{m,m'}^{s,\text{th}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

由式(9)和式(16)中的约束条件 C6 可得 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{s,u}$ 处的最大可容忍干扰阈值 $I_{m'}^{s,\text{th}}$ 为

$$I_{m'}^{s,\text{th}} = \frac{p_m^s g_{m',t',m',r'}^s}{2^{R_{m'}^{\text{th}}} - 1} - \sigma^2 - \sum_{C_n \in H_s} I_{n,m'}^s - \sum_{D_{m''} \in H_s} I_{m'',m'}^s \quad (34)$$

2.2.2 D2D 用户下行子信道分配

对于 $\forall D_m \in H_x^*$, 要接入已分配给 C_n 的子信道 $k_{x,d}$ 时, D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上对 C_n 产生的干扰 $I_{m,n}^x$ 需要低于 C_n 在子信道 $k_{x,d}$ 上的最大可容忍干扰阈值 $Q_{n,x}$, 由式(8)和式(16)中约束条件 C5 可得

$$Q_{n,x} = \frac{p_B^{\text{max}} g_{B,n}^x}{2^{R_n^{\text{th}}} - 1} - \sigma^2 - \sum_{\forall D_{m'} \in H_x} I_{m',n}^x \quad (35)$$

D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上的发射功率 p_m^x 应满足

$$p_m^x \leq \frac{Q_{n,x}}{g_{m,n}^x}, \forall D_m \in H_x^*, C_n \in H_x, x \in \mathcal{X} \quad (36)$$

对于 $\forall D_{m'} \in H_x$, 为确保 D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上的传输质量, 对于 $\forall D_m \in H_x^*$, 若 D_m 接入子信道 $k_{x,d}$, 则 D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上对 $D_{m'}$ 的干扰 $I_{m,m'}^x$ 应低于 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{x,d}$ 上的最大可容忍干扰阈值 $Q_{m',x}$, 由式(10)和式(16)中约束条件 C6 可得

$$Q_{m',x} = \frac{p_m^x g_{m',t',m',r'}^x}{2^{R_{m'}^{\text{th}}} - 1} - \sum_{C_n \in H_x} I_{B,m'}^x - \sigma^2 - \sum_{D_{m''} \in H_x, D_{m''} \neq D_{m'}} I_{m'',m'}^x \quad (37)$$

另外, p_m^x 还应该满足

$$p_m^x \leq \frac{Q_{m',x}}{g_{m,m'}^x}, \forall D_m \in H_x^*, D_{m'} \in H_x, x \in \mathcal{X} \quad (38)$$

根据式(16)中约束条件 C9、式(38)和式(40), 对于 $\forall D_m \in H_x^*$, D_m 接入子信道 $k_{x,d}$ 的功率上限值 $p_m^{x,\text{upper}}$ 为

$$p_m^{x,\text{upper}} = \min \left\{ \frac{Q_{n,x}}{g_{m,n}^x}, \frac{Q_{m',x}}{g_{m,m'}^x}, p_m^{\text{max}} \right\} \quad (39)$$

对于 $\forall D_m \in H_x^*$, 子信道 $k_{x,d}$ 分配给 D_m 后, 为保

障 D_m 的传输质量, $D_{m,t}$ 到 $D_{m,r}$ 的接收信号的功率应满足 $p_m^x g_{m,t,m,r}^x \geq p_m^{x,\text{th}}$, 其中, $p_m^{x,\text{th}}$ 为 D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上的接收功率阈值, 由式(10)和式(16)中约束条件 C6 可得

$$p_m^{x,\text{th}} = \left(\sigma^2 + \sum_{C_n \in H_x} I_{B,m}^x + \sum_{D_{m'} \in H_x} I_{m',m}^x \right) (2^{R_m^{\text{th}}} - 1) \quad (40)$$

由此, 可得到 D_m 接入子信道 $k_{x,d}$ 的功率下限值 $p_m^{x,\text{lower}}$ 为

$$p_m^{x,\text{lower}} = \frac{p_m^{x,\text{th}}}{g_{m,t,m,r}^x}, \forall D_m \in H_x^*, C_n \in H_x \quad (41)$$

设置 p_m^x 的初始值为

$$p_m^{x,\text{opt}} = \arg \max_{p_m^{x,\text{lower}} \leq p_m^x \leq p_m^{x,\text{upper}}} R(H_x) \quad (42)$$

UE 集群 H_x 的干扰矩阵 \mathbf{L}_x 可计算为

$$l_{m,m'}^x = \begin{cases} 1, & I_{m,m'}^x > I_{m,m'}^{x,\text{th}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (43)$$

由式(10)和式(16)中的约束条件 C6 可得 $D_{m'}$ 在子信道 $k_{x,d}$ 处的最大可容忍干扰阈值 $I_{m'}^{x,\text{th}}$ 为

$$I_{m'}^{x,\text{th}} = \frac{p_m^x g_{m',t',m',r'}^x}{2^{R_{m'}^{\text{th}}} - 1} - \sigma^2 - \sum_{C_n \in H_x} I_{B,m'}^x - \sum_{D_{m''} \in H_x} I_{m'',m'}^x \quad (44)$$

基于干扰聚类的基本思想是将候选集群 H_s^* 和 H_x^* 中的 DUE 通过迭代方式聚集到相同子信道对应的集群中, 将第一阶段分配给 CUE 的子信道再次分配给 DUE。同时考虑 DUE 的发射功率、集群和速率以及集群干扰, 以确保每个集群和速率达到最大, 实现最大化系统和速率的目标。基于干扰聚类的资源分配 (IC-RA, interference clustering-based resource allocation) 算法如算法 2 所示。

算法 2 基于干扰聚类的资源分配算法 (IC-RA)

初始化: $\pi_{s,m} = 0$, $\pi_{x,m} = 0$, $p_m^s = 0$, $p_m^x = 0$,

$H_s^* = \mathcal{D}$, $H_x^* = \mathcal{D}$, $\Delta R_m^s = -\infty$, $\Delta R_m^x = -\infty$, $\forall s \in \mathcal{S}$, $\forall x \in \mathcal{X}$, $n \in \mathcal{N}$, $\forall m \in \mathcal{M}$

- 1) **for each** $k_{s,u} \in \mathcal{K}$, $k_{x,d} \in \mathcal{K}$ **do**
- 2) **while** $H_s^* \neq \emptyset$, $H_x^* \neq \emptyset$ **do**
- 3) **for each** $D_m \in H_s^*$, $D_{m'} \in H_x^*$ **do**
- 4) 根据式(29)、式(31)、式(39)和式(41)计算 $p_m^{s,\text{upper}}$ 、 $p_m^{s,\text{lower}}$ 、 $p_m^{x,\text{upper}}$ 和 $p_m^{x,\text{lower}}$;
- 5) **if** $p_m^{s,\text{lower}} \leq p_m^{s,\text{upper}}$, $p_m^{x,\text{lower}} \leq p_m^{x,\text{upper}}$ **then**
- 6) 假设将子信道 $k_{s,u}$, $k_{x,d}$ 分配给 D_m ;
- 7) 计算 D_m 在集合 $H_s \cup \{D_m\}$ 和 $H_x \cup \{D_m\}$ 上的发射功率 $p_m^{s,\text{opt}}$ 和 $p_m^{x,\text{opt}}$;
- 8) 根据 $p_m^{s,\text{opt}}$ 和式(45)计算 ΔR_m^s , 根据 $p_m^{x,\text{opt}}$ 和

式(46)计算 ΔR_m^x ;

9) **end if**

10) **end for**

11) 根据 $p_m^{s,opt}$ 与候选集群 H_s^* 得到干扰矩阵 L_s , 根据 $p_m^{x,opt}$ 和候选集群 H_x^* 得到干扰矩阵 L_x ;

12) 找出可以最大限度增加集群和速率的最优 DUE 即 $D_m^{s*} = \arg \max \Delta R_m^s, \forall D_m \in H_s^*, D_m^{x*} = \arg \max \Delta R_m^x, \forall D_m \in H_x^*$;

13) **if** $\Delta R_m^{s*} \geq 0, \Delta R_m^{x*} \geq 0$ **then**

14) $\pi_{s^*,m} = 1, p_m^{s*} = p_m^{s,opt*}, \pi_{x^*,m} = 1, p_m^{x*} = p_m^{x,opt*}$;

15) $H_s = H_s \cup \{D_m^{s*}\}, H_s^* = H_s^* \setminus \{D_m^{s*}\}, H_x = H_x \cup \{D_m^{x*}\},$

$H_x^* = H_x^* \setminus \{D_m^{x*}\}$;

16) $H_s^* = H_s^* \setminus \{M_m^{s*}\}, H_x^* = H_x^* \setminus \{M_m^{x*}\}$;

17) **else**

18) **break**

19) **end if**

20) **end while**

21) **end for**

首先, 依据第一阶段 CUE 资源分配结果, 将 CUE 分配到对应子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 的 UE 集群 H_s 和 H_x 中, 之后开始 DUE 资源分配。

步骤 1) 至步骤 4): 若候选集群 H_s^* 和 H_x^* 不是空集, 根据式(29)和式(31)计算候选集群 H_s^* 中所有候选 DUE 在子信道 $k_{s,u}$ 上的功率上限 $p_m^{s,upper}$ 和功率下限 $p_m^{s,lower}$; 同理, 根据式(39)和式(41)计算候选集群 H_x^* 中所有候选 DUE 在子信道 $k_{x,d}$ 上的功率上限 $p_m^{x,upper}$ 和功率下限 $p_m^{x,lower}$ 。

步骤 5) 至步骤 6): 若 D_m 在子信道 $k_{s,u}$ 上的功率下限低于其功率上限, 即 $p_m^{s,lower} \leq p_m^{s,upper}$, 表明 D_m 重用子信道 $k_{s,u}$ 不会对共享子信道的 C_n 以及其他 DUE 造成严重干扰, 进而假设将子信道 $k_{s,u}$ 分配给候选 DUE, $D_m \in H_s^*$ 。类似地, 若 D_m 在子信道 $k_{x,d}$ 上的功率下限低于其功率上限, 即 $p_m^{x,lower} \leq p_m^{x,upper}$, 假设将子信道 $k_{x,d}$ 分配给候选 DUE, $D_m \in H_x^*$ 。

步骤 7) 至步骤 10): 根据式(32)计算出 D_m 在加入 H_s 后的最佳发射功率 $p_m^{s,opt}$, 使 $R(H_s)$ 最大, 并根据 $p_m^{s,opt}$ 计算 D_m 加入 H_s 后所能产生的速率增益 ΔR_m^s ; 同理, 由式(42)得到 D_m 在加入 H_x 后的最佳发射功率 $p_m^{x,opt}$, 使 $R(H_x)$ 最大, 由 $p_m^{x,opt}$ 计算 D_m 加入 H_x 后可产生的速率增益 ΔR_m^x 。 ΔR_m^s 和 ΔR_m^x 计算如下

$$\Delta R_m^s = R(H_s \cup \{D_m\}) - R(H_s) \quad (45)$$

$$\Delta R_m^x = R(H_x \cup \{D_m\}) - R(H_x) \quad (46)$$

步骤 11) 至步骤 14): 将 $p_m^{s,opt}$ 代入式(33)计算干扰矩阵 L_s 。从候选集群 H_s^* 中为子信道 $k_{s,u}$ 选择出最佳分配 DUE, 用 D_m^{s*} 表示。选择的标准是, 将 D_m^{s*} 添加到集群 H_s 后, D_m^{s*} 能够最大限度地增加集群和速率, 即选择 $D_m^{s*} = \arg \max \Delta R_m^s, \forall D_m \in H_s^*$ 。同理, 将 $p_m^{x,opt}$ 代入式(43)计算干扰矩阵 L_x 。从候选集群 H_x^* 中为子信道 $k_{x,d}$ 选择出最佳分配 DUE 记作 D_m^{x*} , 即选择 $D_m^{x*} = \arg \max \Delta R_m^x, \forall D_m \in H_x^*$ 。为确保 D_m^{s*} (或 D_m^{x*}) 加入集群 H_s (或 H_x) 后能够增加集群和速率或对集群和速率不会产生负面影响, 必须满足条件 $\Delta R_m^{s*} \geq 0$ (或 $\Delta R_m^{x*} \geq 0$), 才能将子信道 $k_{s,u}$ (或 $k_{x,d}$) 分配给 D_m^* 。同时更新 D_m^* 的发射功率 $p_m^{s*} = p_m^{s,opt*}$ (或 $p_m^{x*} = p_m^{x,opt*}$)。

步骤 15) 至步骤 17): 将 D_m^{s*} 加入集群 H_s 后, 需要从候选集群 H_s^* 中删除 D_m^{s*} 及与 D_m^{s*} 共享子信道 $k_{s,u}$ 后干扰会超出阈值的所有 DUE, 即 $H_s^* = H_s^* \setminus \{M_m^{s*}\}$ 。其中, $M_m^{s*} = \{D_m | I_{m^*,m}^s = 1, \forall D_m \in H_s^*\}$ 为 D_m^{s*} 为超出干扰阈值的 DUE 集合。同理, 将 D_m^{x*} 加入集群 H_x 后, 从候选集群 H_x^* 中删除 D_m^{x*} 及与 D_m^{x*} 共享子信道 $k_{x,d}$ 后干扰会超出阈值的所有 DUE, 即 $H_x^* = H_x^* \setminus \{M_m^{x*}\}$, 而 $M_m^{x*} = \{D_m | I_{m^*,m}^x = 1, \forall D_m \in H_x^*\}$ 为 D_m^{x*} 超出干扰阈值的 DUE 集合。

步骤 2) 至步骤 20): 重复 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 的分配过程, 直到 H_s^* 和 H_x^* 为空集或者 $\Delta R_m^{s*} < 0$ 且 $\Delta R_m^{x*} < 0$ 。当所有子信道分配完后, 即系统中再无可供 DUE 重用的子信道, 算法结束。DUE 的资源分配结果由子信道分配矩阵和功率分配矩阵得到。算法 1 和算法 2 的联合执行流程如图 2 所示。

通过获得的 CUE 和 DUE 子信道分配结果, 可计算系统中接入的通信链路数量 U , 其表征了网络中 DUE 可接入网络传输业务的机会, 可表示为

$$U = \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \pi_{s,n} + \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^X \pi_{x,n} + \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \pi_{s,m} + \sum_{m=1}^M \sum_{x=1}^X \pi_{x,m} \quad (47)$$

2.3 算法复杂度分析

第一阶段, WBGM-RA 算法的复杂度取决于使用的 KM 算法, 最坏情况下, 计算复杂度为 $O(KT^3)$, 其中, $T = \max\{N, K\}$ 。第二阶段, 步骤 2) 至步骤 20) 的执行次数由 H_s^* 和 H_x^* 中的顶点数量决定, 而 H_s^* 和 H_x^* 中的顶点数量随循环次数的增加逐渐减少。假设在子信道 $k_{s,u}$ 和 $k_{x,d}$ 上, DUE 之间由信道共享带来的

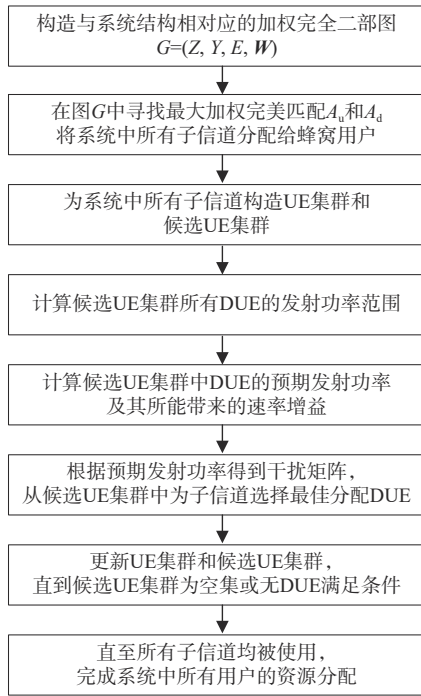


图2 算法1和算法2的联合执行流程

干扰皆可容忍，步骤13)至步骤19)只删除 H_s^* 和 H_x^* 中的一个最佳分配DUE，因为这种情况下与该DUE共享子信道的其他DUE对的干扰均没有超过干扰阈值，即 M_m^{s*} 和 M_m^{x*} 为空集。在最坏情况下，步骤2)至步骤20)需要执行 $K + (K - 1) + \dots + 1$ 次，即步骤2)至步骤20)的时间复杂度为 $O(K(1 + K)/2)$ 。因此，在最坏情况下，IC-RA算法的时间复杂度为 $O(KM(1 + K)/2) \approx O(MK^2/2)$ 。本文所提方案的整体时间复杂度约为 $O(KT^3 + MK^2/2)$ 。

文献[25]提出了3种算法：联合上行链路和下行链路（JUAD, joint uplink and downlink）资源分配算法，JUAD算法首先将最优功率分配问题表述为一个非线性规划问题，并通过在有限集合中搜索得到最优解，然后提出了一种最大权重二部匹配方案，为每个DUE选择最佳子载波；所有DUE只重用上行链路（OU）资源分配算法；所有DUE只重用下行链路（OD）资源分配算法。上述3种算法的时间复杂度均至少为 $O(KM^3)$ 。文献[27]提出了3种算法：联合上行-下行资源分配（JUDRA, joint uplink-downlink resource allocation）算法，JUDRA算法首先利用顺序几何规划技术进行子载波分配，然后利用得到的结果求出DUE功率分配的最优解；只重用上行链路资源分配（OURA）算法；只重用下行链路资源分配（ODRA）算法。上述3种算法的时

间复杂度均至少为 $O(\sqrt{M + N} (M + N)^3)$ 。本文所提算法与文献[25, 27]所提算法时间复杂度相当。

3 仿真结果与分析

考虑CUE与DUE共存的单元小区联合上行链路和下行链路传输的场景，其中，DUE的数量远多于CUE的数量和子信道数量。BS位于半径为500 m的小区中心，CUE和DUE在小区内随机均匀分布，同一个DUE收发对的发射机和接收机间最大距离设置为50 m。仿真实验在MATLAB环境中生成的3 000个不同位置的CUE和DUE以及相应的信道增益条件下进行的。主要仿真参数见表2。

表2 主要仿真参数

参数	数值
蜂窝半径	500 m
上行子信道数量(S)	15
下行子信道数量(X)	15
CUE数量(N)	15
DUE对数量(M)	25~70
BS最大发射功率(p_B^{\max})	43 dBm
CUE最大发射功率(p_n^{\max})	24 dBm
DUE最大发射功率(p_m^{\max})	24 dBm
CUE基本速率需求(R_n^{th})	2~10 bit/(s·Hz)
DUE基本速率需求(R_m^{th})	2~20 bit/(s·Hz)
DUE收发距离	10~50 m
噪声功率谱密度	-174 bit/(s·Hz)
路径损耗指数(α)	3
路径损耗常数(δ)	1.0×10^{-2}
小尺度衰落增益(β)	均值为1的指数分布
大尺度衰落增益(ζ)	标准差为8 dB的对数正态阴影

将本文第一阶段所提WBGm-RA算法和第二阶段所提IC-RA算法相结合称为联合上下行信道资源分配算法，记作WBGm-IC算法。为了进一步展示联合上下行信道资源分配的优势，本文还提出DUE只重用上行信道的资源分配算法，记作WBGm-IC-U，该算法采用WBGm-RA算法为CUE分配上行信道资源，采用IC-RA算法为DUE分配上行信道资源；DUE只重用下行信道的资源分配算法，记作WBGm-IC-D，该算法采用WBGm-RA算法为CUE分配下行信道资源，采用IC-RA算法为DUE分配下行信道资源。上述3种算法与文献[25, 27]所提算法进行对比分析。

$N=15, M=30$ ，用户位置分布示例如图3所示，

$N=15, M=30$, 信道分配结果示例如图4所示。图4是对应图3中的用户位置分布, 采用本文所提WBGM-IC算法后的子信道分配结果, 图4中每一个横坐标对应UE分配给其纵坐标对应的子信道。图4展示了所提算法在信道复用方面的有效性, 从图4中可以看出, 每个CUE占用的信道资源都可以同时由多个DUE复用, 而每个DUE也可以同时复用多个CUE占用的信道资源, 实现了“多对多”机制下的频谱资源高效利用。这一分配机制是其他算法分配结果中没有的。

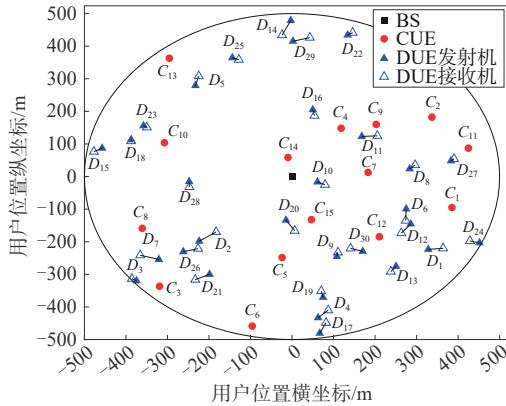


图3 $N=15, M=30$, 用户位置分布示例

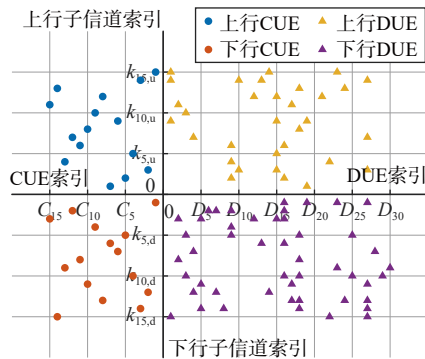


图4 $N=15, M=30$, 信道分配结果示例

$R_n^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}), R_m^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE数量对系统和速率的影响如图5所示。随着DUE数量的增加, 各种算法的系统速率也增加。所提WBGM-IC算法性能最优, 相较于JUDRA算法, 系统和速率至少增加了27%, 相较于JUAD算法, 系统和速率至少增加了31%。由此可以看出, “多对多”复用方式相较于“一对一”和“多对一”复用方式, 可以带来更高的频谱利用率, 进一步增加系统和速率。另外, 同时复用上行和下行资源的分配算法如所提WBGM-IC算法, 比WBGM-IC-U算法和WBGM-IC-D算法给系统带来的和速率增益更大。

同样地, JUDRA算法比OURA算法和ODRA算法更好, JUAD算法也优于OU算法和OD算法。

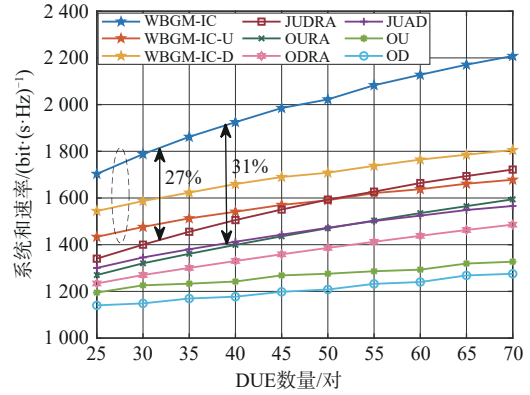


图5 $R_n^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}), R_m^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE数量对系统和速率的影响

根据式(47), $R_n^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}), R_m^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE数量对系统通信链路数量的影响如图6所示。随着DUE数量的增加, 每种算法支持的通信链路数量也增加。所提WBGM-IC算法支持的通信链路数量远超其他算法, 与JUDRA算法相比至少增加了62%, 与JUAD算法相比至少增加了112%。JUAD算法性能最差, 由于JUAD算法采用“一对一”信道复用方式。所以当网络中CUE数量固定, DUE数量逐渐增加直到远超CUE数量时, 网络中可以支持的通信链路数量将逐步达到最大值。而所提WBGM-IC算法不受影响, 在满足所有UE基本速率的情况下, 网络中的通信链路数量可以持续增加, 从而带来系统和速率的持续增加。此仿真结果再次验证了“多对多”复用方式的有效性。

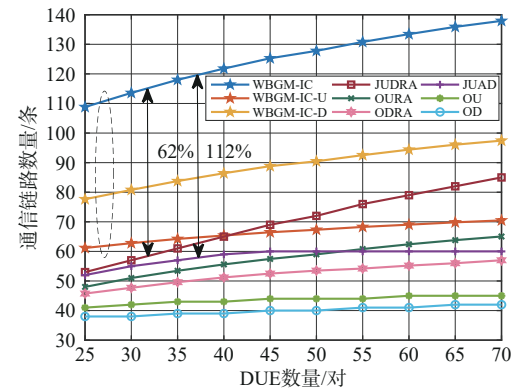


图6 $R_n^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}), R_m^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE数量对系统通信链路数量的影响

$R_n^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz}), R_m^{\text{th}} = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE接入率与DUE数量的关系如图7所示, 其中, DUE接

入率定义为成功接入网络中的DUE数量与系统中总的DUE数量的比值。由于网络中总的子信道数量是固定的，所有算法的DUE接入率均随DUE数量的增加而降低。所提WBGM-IC算法展现出良好的性能优势，在DUE数量达到70时，WBGM-IC算法的DUE接入率仍可维持在90%以上。这是由于第二阶段提出的IC-RA算法可以精准确定各UE之间的干扰情况，根据UE之间的干扰关系在满足所有UE基本速率需求的情况下为大多数DUE找到合适的共享子信道。所提WBGM-IC算法与JUDRA算法和JUAD算法相比，分别可以增加8.7%~21.5%和13.6%~122%的DUE接入率。

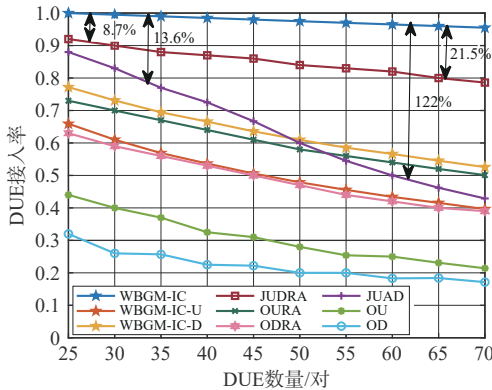


图7 $R_n^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE接入率与DUE数量的关系

$M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对系统和速率的影响如图8所示。若提高CUE的基本速率需求，则所有算法的性能均下降。原因是CUE基本速率需求提高，CUE需要占用更多的频谱资源来满足其传输速率的需求，可供DUE重用的子信道资源越少，DUE和速率减少。CUE基本速率需求增加带来的CUE整体和速率的增加无法弥补DUE和速率的减少，使得系统和速率减少。

$M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对系统通信链路数量的影响如图9所示。随着CUE基本速率需求的增加，不同算法支持的通信链路数量在减少。当网络中的子信道数量和CUE数量固定时，网络中的通信链路数量与接入网络的DUE链路数量约成正比。而提高CUE基本速率需求，使得满足DUE复用需求的子信道减少，接入网络的DUE链路减少。

$M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对DUE接入率的影响如图10所示。提高CUE基本

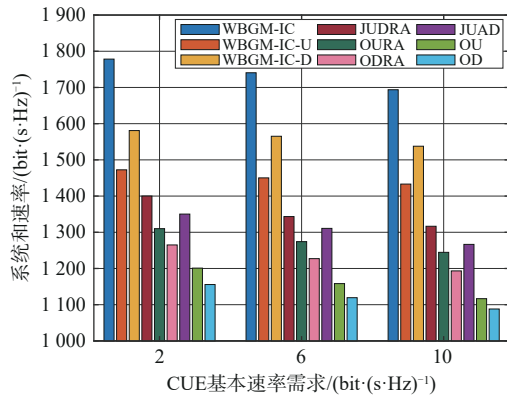


图8 $M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对系统和速率的影响

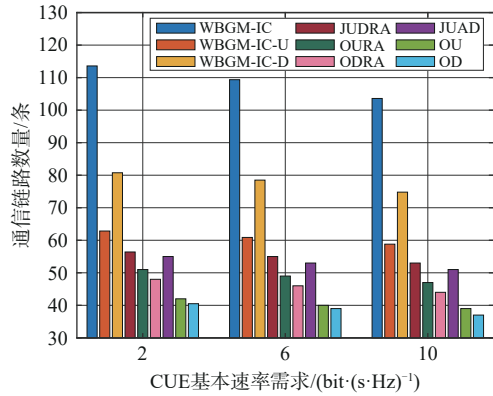


图9 $M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对系统通信链路数量的影响

速率需求，所有算法可实现的DUE接入率均有所下降。本文所提WBGM-IC算法相较于其他算法性能最优，DUE接入率始终保持在95%以上。而JUDRA算法比JUAD算法效果好，这是由于JUDRA算法所采用的“多对一”复用方式相较于JUAD算法使用的“一对一”复用方式，可以帮助更多的DUE接入网络。

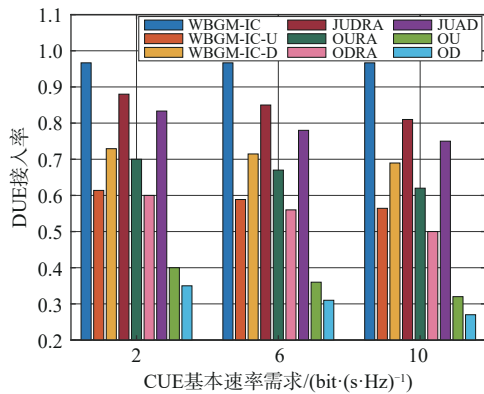


图10 $M=30$, $R_m^h = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, CUE基本速率需求对DUE接入率的影响

$M=30$, $R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对系统和速率的影响如图 11 所示。在初始阶段, 随着 DUE 基本速率需求的提高, 所有算法的系统速率均有所增长。原因是 DUE 和速率整体增长弥补了 CUE 速率减少给系统和速率带来的负面影响。但随着 DUE 基本速率需求进一步提高, 网络中接入的通信链路数量大幅降低, 使得接入网络中的 DUE 和速率带来的增长, 无法弥补减少的 DUE 链路数量和受到巨大干扰的 CUE 两部分和速率的损失, 导致系统和速率呈现下降趋势。所提 WBGM-IC 算法相较于 JUDRA 算法和 JUAD 算法至少可以增加 28% 和 30% 的系统速率。

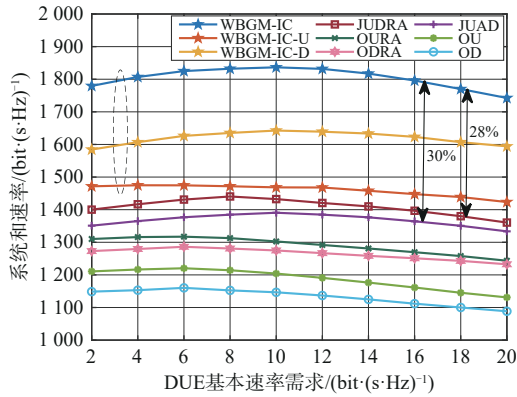


图 11 $M=30, R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对系统和速率的影响

$M=30$, $R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对系统通信链路数量的影响如图 12 所示。随着 DUE 基本速率需求的增加, 各种算法支持的通信链路数量减少。这是由于 DUE 基本数量需求增加, 同一子信道上可以接入的 DUE 数量减少, 在 CUE 数量不变的情况下, 网络中的通信链路数量减少。

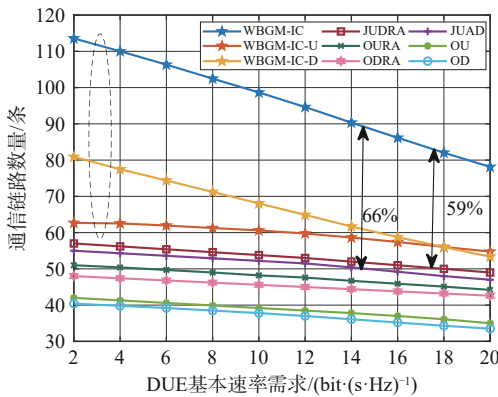


图 12 $M=30, R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对系统通信链路数量的影响

所提 WBGM-IC 算法表现最优, 可以支持的通信链路数量比 JUDRA 算法和 JUAD 算法至少增加了 59% 和 66%。

$M=30$, $R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对 DUE 接入率的影响如图 13 所示。随着 DUE 基本速率需求的增加, 不同算法的 DUE 接入率均降低。这是由于部分 DUE 基本速率需求的增加, 使同一子信道上可以接入的 DUE 数减少, 只有能给网络中带来更大速率增益的 DUE 才能接入网络, 故 DUE 接入率下降。所提 WBGM-IC 算法相较于 JUDRA 算法和 JUAD 算法分别可以增加 6.7%~52.4% 和 15.6%~71.4% 的 DUE 接入率。

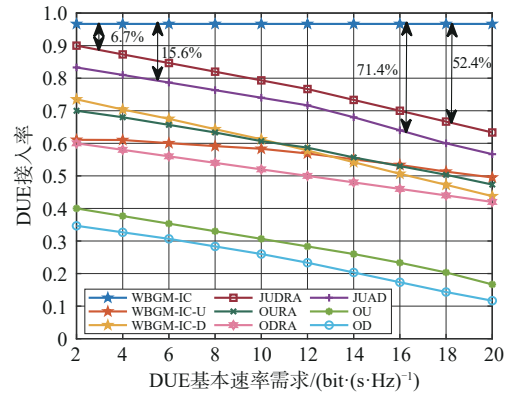


图 13 $M=30, R_n^b = 2 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, DUE 基本速率需求对 DUE 接入率的影响

4 结束语

本文研究了蜂窝网络中 D2D 通信联合上行和下行信道资源分配问题, 旨在保证网络中所有 UE 基本速率需求的同时最大化系统和速率。优化问题是一个复杂的 MINLP 问题, 本文将该问题分为两个阶段, 在第一阶段将 CUE 资源分配建模为加权二部图, 在第二阶段, 提出基于干扰聚类的资源分配算法, 利用干扰矩阵为网络中的 DUE 分配合适的子信道资源。理论分析与仿真结果表明, 在系统和速率方面, 所提联合上下行信道资源分配算法 WBGM-IC 算法相较于 JUDRA 算法至少增加了 27%, 相较于 JUDA 算法至少增加了 31%; 在支持的通信链路数量方面, 所提 WBGM-IC 算法与 JUDRA 算法相比至少增加了 62%, 与 JUAD 算法相比至少增加了 112%; 在 DUE 接入率方面, 所提 WBGM-IC 算法与 JUDRA 算法和 JUAD 算法相比, 分别可以增加 8.7%~21.5% 和 13.6%~122%。另外,

仿真结果同样展现了联合上下行信道资源分配的有效性,在所对比的3个方面WBG-IC算法均优于WBG-IC-U算法和WBG-IC-D算法。类似地,JUDRA算法优于ODRA算法和OURA算法,JUAD算法优于OU算法和OD算法。本文提出的资源分配算法可以为现实中的D2D通信提供一种高效低复杂度的解决方案。本文算法的具体实施依赖于BS可以获得完全信道状态信息的条件下,这可能导致网络内部需要承受相应的系统开销负担。未来的研究需要扩展到不同系统开销约束条件、动态信道环境以及多蜂窝小区下的D2D资源分配等。

参考文献:

- [1] YANG H, YE Y, CHU X, et al. Resource and power allocation in SWIPT-enabled device-to-device communications based on a non-linear energy harvesting model[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(11): 10813-10825.
- [2] GISMALLA M S M, AZMI A I, SALIM M R B, et al. Survey on device to device (D2D) communication for 5G/6G networks: concept, applications, challenges, and future directions[J]. *IEEE Access*, 2022(10): 30792-30821.
- [3] VO N S, PHAN T M, BUI M P, et al. Social-aware spectrum sharing and caching helper selection strategy optimized multicast video streaming in dense D2D 5G networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 15(3): 3480-3491.
- [4] KHUNTIA P, HAZRA R. An efficient channel and power allocation scheme for D2D enabled cellular communication system: an IoT application[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(22): 25340-25351.
- [5] BARIK P K, SHUKLA A, DATTA R, et al. A resource sharing scheme for intercell D2D communication in cellular networks: a repeated game theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7806-7820.
- [6] HUANG S, CHUAI G, GAO W. Coalitional games based resource allocation for D2D uplink underlaying hybrid VLC-RF networks[C]// *Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE, 2022: 2316-2321.
- [7] GBADAMOSI S A, HANCKE G P, ABU-MAHFOUZ A M. Interference avoidance resource allocation for D2D-enabled 5G narrowband internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(22): 22752-22764.
- [8] SANUSI I O, NASR K M, MOESSNER K. Radio resource management approaches for reliable device-to-device (D2D) communication in wireless industrial applications[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2020, 7(3): 905-916.
- [9] RAGHU T V, KIRAN M. A survey on device to device communications[C]// *Proceedings of the 2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*. Piscataway: IEEE, 2022: 1-6.
- [10] ZHANG H, SONG L, HAN Z. Radio resource allocation for device-to-device underlay communication using hypergraph theory[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4852-4861.
- [11] CAI Y, JIN S, YU W, et al. Cooperative distributed resource allocation in heterogeneous networks with D2D communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 16426-16440.
- [12] HU C G, YANG C D, FANG X T, et al. A D2D resource allocation method for IoT network[C]// *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Piscataway: IEEE, 2021: 58-62.
- [13] YUAN Y, YANG T, FENG H, et al. An iterative matching-stackelberg game model for channel-power allocation in D2D underlaid cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(11): 7456-7471.
- [14] HUANG J, XING C, GUIZANI M. Power allocation for D2D communications with SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(4): 2308-2320.
- [15] TANG W, SUN R X, CHENG F Y. A novel whale algorithm-based optimization method for D2D resource allocation[C]// *Proceedings of the 2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Piscataway: IEEE, 2023: 66-71.
- [16] SAWYER N, SMITH D B. Flexible resource allocation in device-to-device communications using stackelberg game theory[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 67(1): 653-667.
- [17] ELNOURANI M, DESHMUKH S, BEFERULL-LOZANO B. Distributed resource allocation in underlay multicast D2D communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3409-3422.
- [18] LI W L, QIN X Z, JIA Z H, et al. Resource sharing for cellular-assisted D2D communications with imperfect CSI: a many-to-many strategy[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(3): 4454-4465.
- [19] NAJLA M, BECVAR Z, MACH P. Reuse of multiple channels by multiple D2D pairs in dedicated mode: a game theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4313-4327.
- [20] 申滨, 孙万平, 张楠, 等. 基于加权二部图及贪婪策略的蜂窝网络D2D通信资源分配[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(3): 1055-1064.
- [21] SHEN B, SUN W P, ZHANG N, et al. Resource allocation based on weighted bipartite graph and greedy strategy for D2D communication in cellular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(3): 1055-1064.
- [21] ALGEDIR A, REFAI H H. Energy-efficient D2D communication under downlink HetNets[C]// *Proceedings of the 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE, 2019: 1-6.

- [22] DOMINIC S, JACOB L. Distributed resource allocation for D2D communications underlying cellular networks in time-varying environment[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 22(2): 388-391.
- [23] LAI W K, WANG Y C, LIN H C, et al. Efficient resource allocation and power control for LTE-A D2D communication with pure D2D model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3202-3216.
- [24] ZHANG R, CHENG X, YANG L, et al. Interference graph-based resource allocation (InGRA) for D2D communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 64(8): 3844-3850.
- [25] KAI C, XU L, ZHANG J, et al. Joint uplink and downlink resource allocation for D2D communication underlying cellular networks[C]//Proceedings of the 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [26] YANG T, ZHANG R, CHENG X, et al. Graph coloring based resource sharing (GCRS) scheme for D2D communications underlying full-duplex cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7506-7517.
- [27] PAWAR P, TRIVEDI A. Joint uplink-downlink resource allocation for D2D underlying cellular network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8352-8362.
- [28] SHAMAEI S, BAYAT S, HEMMATYAR A M A. Interference-aware resource allocation algorithm for D2D-enabled cellular networks using matching theory[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023.
- [29] KAI C, LI H, XU L, et al. Joint subcarrier assignment with power allocation for sum rate maximization of D2D communications in wireless cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4748-4759.

[30] KUHN H W. The hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1-2): 83-97.

[31] 王方洋, 刘玉铭. 针对带约束匹配搜索的扩展 Kuhn-Munkres 算法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 167-172.
WANG F Y, LIU Y M. Extended Kuhn-Munkres algorithm for constrained matching search[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2021, 57(2): 167-172.

[作者简介]



申滨(1978-), 男, 博士, 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为下一代移动通信、大规模MIMO系统、认知无线电等。



元文军(1997-), 女, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为图论、无线通信资源分配。



李旋(2000-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为语义通信资源分配。