

超密集工业物联网中基于超图匹配的频谱分配方法

王琴^{1, 2, 3}, 昌昊天^{1, 2, 3}, 朱洪波^{1, 2, 3}

(1. 南京邮电大学物联网研究院, 江苏 南京 210003; 2. 江苏省无线通信与物联网重点实验室, 江苏 南京 210003;
3. 教育部泛在网络健康服务系统工程研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着工业物联网 (IIoT, industrial Internet of things) 的快速发展, 网络全要素各实体间的关系更加复杂、动态、多维, 现有信息交互技术难以准确描述 IIoT 全要素的高密度、大规模和复杂的交互关系。针对宏小区场景中网络实体间资源分配的关联关系, 构建了基于超图的宏小区速率和最大化问题。在该场景中, 采用非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术支持 IIoT 设备的多址接入, 同时引入设备直连 (D2D, device-to-device) 通信技术以降低设备之间的干扰并提高频谱效率。在构建宏小区飞蜂窝基站及其内部设备之间的超图干扰模型时, 将飞蜂窝接入点 (FAP, femtocell access point) 定义为顶点, 干扰关系定义为边和超边, 通过分析超图中的超边关系, 让产生较少干扰的基站共享同一频谱, 并采用基于超图的最大顶点权重团算法, 实现频谱资源最优分配及频谱共享匹配。仿真结果表明, 相比于基于图的资源方案, 该方法可以显著提高频谱效率, 并且在高密度、大规模和复杂的环境下具有较好的适应性和可扩展性, 为 IIoT 在超密集无线网络环境下的资源分配问题提供了有效解决方案。

关键词: 工业物联网; 非正交多址接入; D2D 群组; 超图; 最大团问题; 资源分配

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00401

Spectrum allocation and device association in ultra-dense industrial IoT via hypergraph matching

WANG Qin^{1,2,3}, CHANG Haotian^{1,2,3}, ZHU Hongbo^{1,2,3}

1. Institute of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications and Internet of Things, Nanjing 210003, China

3. Engineering Research Center of Health Service System based on Ubiquitous Wireless Networks, Nanjing 210003, China

Abstract: With the rapid development of industrial Internet of thing (IIoT), the relationship between all entities of the network elements became more complex, dynamic and multidimensional. It was difficult to accurately describe the high-density, large-scale and complex interaction relationship of all elements in IIoT through existing information interaction technology. Focusing on the interrelation of resource allocation among network entities in macrocell scenarios, sum-rate maximizing problem in IIoT macrocell based on hypergraph was studied and constructed. Non-orthogonal multiple access (NOMA) technology was considered in this scenario to support multiple access between industrial Internet devices. Device-to-device (D2D) communication technology was introduced to reduce interference between devices and improve spectral efficiency. When constructing the interference model among femtocells and their internal devices, the femtocell access points (FAP) were defined as vertices, and the interference relationships were defined as edges and hyperedges. By

收稿日期: 2024-04-23; 修回日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (No. 92367302); 江苏省重点研发计划项目 (No. BE2022068, No. BE2022068-2); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究重大项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 92367302), The Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No. BE2022068, No. BE2022068-2), The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China

analyzing the hyperedge relationships in the hypergraph, base stations causing less interference were allowed to share the same spectrum, and a maximum vertex-weight cluster algorithm based on the hypergraph was used to achieve optimal spectrum resource allocation and spectrum sharing matching. Simulation results demonstrated that, compared to graph-based resource schemes, the proposed method significantly improves spectral efficiency and exhibits better adaptability and scalability in high-density, large-scale, and complex environments, providing an effective solution for resource allocation in IIoT under ultra-dense wireless network conditions.

Key words: industrial Internet of thing, non-orthogonal multiple access, device-to-device cluster, hypergraph, maximum clique problem, resource allocation

0 引言

工业物联网 (IIoT, industrial Internet of things) 作为新一代信息技术与制造业深度融合的产物, 通过实现人、机、物等全要素的全面互联, 为传统工业生产制造模式的转型升级开辟了新的路径^[1]。随着 IoT 技术及 IIoT 的快速发展, 超密集无线网络 (UDWNs, ultra-dense wireless networks) 的部署需求不断增加。UDWNs 是指在有限的频谱资源下, 大量无线设备集中在相对小的空间范围内进行通信的网络系统。在 UDWNs 环境中, 大量的工业物联网设备 (IIoTE, industrial Internet of things equipment) 同时接入网络, 导致信号干扰加剧、网络资源紧张及频谱效率低下等问题^[2]。因此, 亟须寻求超密集网络下更高效的资源分配方案, 尤其是针对频谱资源短缺的问题, 需要制定精细化的频谱分配和共享方案。

飞蜂窝小区是密集网络下的一种常见的网络部署方式。因其覆盖半径通常在几十米至几百米之间, 飞蜂窝小区能够有效均衡网络中的用户分布, 降低用户间的干扰, 并在超密集网络中提供更高的频谱资源利用率、更低的传输功率和更高的网络容量^[3-4]。飞蜂窝小区通过提供局部覆盖的小型基站, 通常部署在设备或人口密集的区域, 如室内场所、高楼大厦等。在飞蜂窝小区中, 常搭配使用多用户接入技术, 使多个用户能够同时访问共享资源, 从而提高网络容量、传输效率和资源利用率。然而, 由于传统的频分多址、时分多址和码分多址等资源分配方案对大规模设备的支持能力有限, 非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 作为一种高效的资源分配技术被广泛使用。与传统的多址接入技术不同, NOMA 技术允许多个用户共享同一时间和频率资源。在发送端, 系统根据用户的信道条件 (如用户与基站的距离) 为不同用户分

配不同的功率水平, 通常是信道条件较差的用户分配更高的功率。在接收端, 则采用串行干扰消除 (SIC, serial interference cancellation) 技术逐步解码和消除其他用户的信号, 从而提取出目标用户信号^[5-7]。这使得 NOMA 能够在蜂窝通信和物联网通信中得到更高的频谱效率。

然而, 大量的飞蜂窝基站接入点 (FAP, femto-cell access point) 在频谱共享的过程中带来了严重的干扰问题。为保障用户的服务质量 (QoS, quality of service), 需要一种合理且高效的频谱共享分配技术来解决这个问题。文献[8]分析了基于 NOMA 的下行链路和上行链路多小区无线系统模型, 以评估系统中断概率和平均可实现速率。文献[9]进一步寻求了在基于 NOMA 和多输入多输出技术系统中的最大权重和速率。文献[10]则提出了一种设备直连 (D2D, device-to-device) 通信方案, 通过复用蜂窝系统上行或下行频谱资源, 有效降低了通信系统核心网络的数据负载, 并大大提高了频谱利用率和网络吞吐量。在 D2D 通信中, 邻近用户设备可以直接进行点对点的数据传输而不需要经过基站的中继, 因此可以有效降低基站的负载, 提高数据传输速率和系统频谱效率。文献[11]考虑允许至多一个 D2D 链路和蜂窝用户共享频谱资源的简化场景。不过, 随着用户设备部署日益密集, 上述频谱分配算法已难以适应当前的应用需求。文献[12]在效用函数中考虑了 D2D 与用户设备之间的相互干扰和资源共享策略, 提出了一种基于合作博弈的算法, 以逼近最优解。文献[13]也使用博弈论对蜂窝用户设备 (CUE, cellular user equipment) 和 D2D 对之间的频谱资源共享过程进行建模, 但该方法通常需要大量迭代才能收敛, 实现起来较为困难。

在实际应用中, 考虑到 UDWNs 下多终端间频谱资源分配的高度复杂性, 目前仅有类似图论算法

的启发式算法能够提供可行的解决方案。文献[14]在传统图论着色原理算法的基础上,提出了一种结合功率控制与节点优先级计算的资源分配算法,以实现通信性能指标的整体优化。文献[15]借助图论与匹配理论,研究了社交物联网应用场景中的内容共享、用户配对和任务分配等一系列资源分配问题。这类方法虽然简单有效,但在描述设备间错综复杂的关系时仍存在局限。例如,在文献[16]中,该方法为最大化系统吞吐量构建了设备之间的干扰图,但该模型只能反映成对设备之间的干扰关系,却忽略了复杂的累计干扰。与传统图结构相比,超图能够更直观地表示多个元素之间的关联关系^[17]。基于超图的这一优势,文献[18]提出了一种基于位置感知超图着色的频谱分配算法。该算法根据CUE的中断概率划分位置感知区域,限制各区域内可与CUE共享频谱的D2D对集合,并利用超图着色方法进行频谱分配,以抑制累积干扰、增强系统容量。文献[19]和文献[20]利用超图和聚类的方法,提出了支持D2D通信的蜂窝网络的资源分配方案。文献[21]也提出了将Dinkelbach法和以超图为基础的3D匹配方法结合,来优化物联网中的能源效率。然而,这些方法对系统中的干扰分析不够全面,且所提出的设备共享子信道机制也不能较好地提高频谱利用率。

综上所述,尽管已有大量研究采用优化方法解决频谱资源分配问题,但仍有一些问题未被解决。例如,现有研究鲜少考虑超密集网络下的对象关系模型构建,且所提出的方法多针对简单的系统场景进行关系描述建模,难以反映真实场景下的复杂关联。对此,本文结合超图的概念,解决超密集飞蜂窝小区网络中资源分配和对象关联关系的问题。与此同时,部分文献只考虑独立设备场景,没有充分考虑D2D通信需求场景或者更复杂的频谱共享情况,且在系统中多使用传统的多用户接入技术,频谱效率有待进一步地提高。除此之外,部分方案的算法复杂度较高,在具体实施中存在一定困难。针对上述问题,本文一方面引入基于NOMA的D2D群组通信技术^[22],并将该技术与超密集飞蜂窝网络相结合,以进一步提高频谱资源利用率;另一方面,运用超图对蜂窝基站之间的复杂干扰关系进行建模。在此基础上,本文改进文献[23]中提出的基于超图的最大权重团算法^[24-27]来获取最佳频谱资源

分配方案。本文的主要贡献体现在如下几个方面。

1) 提出了一种面向IIoT场景,基于NOMA和正交频分多址(OFDMA, orthogonal frequency division multiple access)的超密集飞蜂窝网络资源分配方案,在保证QoS的前提下,使频谱效率最大化。

2) 在超密集FAP覆盖的宏小区中,引入利用NOMA技术传输的“D2D群组”概念,使得单个D2D发送器能够同时与多个D2D接收器通信。据现有调研,本文属首次利用超图技术对D2D群组的复杂信道分配问题进行建模。

3) 提出一种基于超图的建模方案,用于建立超密集网络环境下基站之间的干扰关系,用超边来定义基站之间的累计干扰,而在过去的通信优化研究中鲜有考虑基站之间的累计干扰。

4) 将资源分配问题归结为一个混合整数规划问题,并利用基于超图的最大顶点权重团算法解决该问题。该算法相比于已有的算法具有更低的时间复杂度,并能获得更高的频谱效率。

5) 仿真结果表明,与本文所述的其他方案相比,所提出的NOMA-超图-D2D群组的优化方案在频谱效率上有所提高,进一步证明将该方案应用于现实的超密集工业物联网场景中是可行且有效的。

1 系统模型与问题描述

1.1 系统模型

本系统考虑一个超密集网络的上行链路资源共享场景,该网络由宏基站和若干飞蜂窝小区组成的。在这样的场景中,每个基站覆盖范围内包含若干个IIoTE及其组成的D2D群组。飞蜂窝基站负责协调常规IIoTE和D2D群组之间的频谱资源分配,并采用NOMA技术来支持设备和D2D群组的多址接入。

IIoT超密集网络的频谱复用场景如图1所示。将IIoT小区网络定义为一个集合,即在一个上行链路宏小区范围内,为一个宏基站分配 K 个子信道: $\{1, \dots, k, \dots, K\}$ 。并配有 F 个FAP: $\{1, \dots, f, \dots, F\}$,在一个FAP作用范围内部署 E 个IIoTE: $\{1, \dots, e, \dots, E\}$ 。其中,FAP中心范围内的IIoTE称为强设备(sIIoTE),即有着较好的信道条件的设备,用 n 表示;位于小区边缘的IIoTE称为弱设备(wIIoTE),即有着较差的信道条件的设备,用 m 表示。此外,小区内还有 Q 个D2D群组: $\{1, \dots, q, \dots, Q\}$ 。D2D

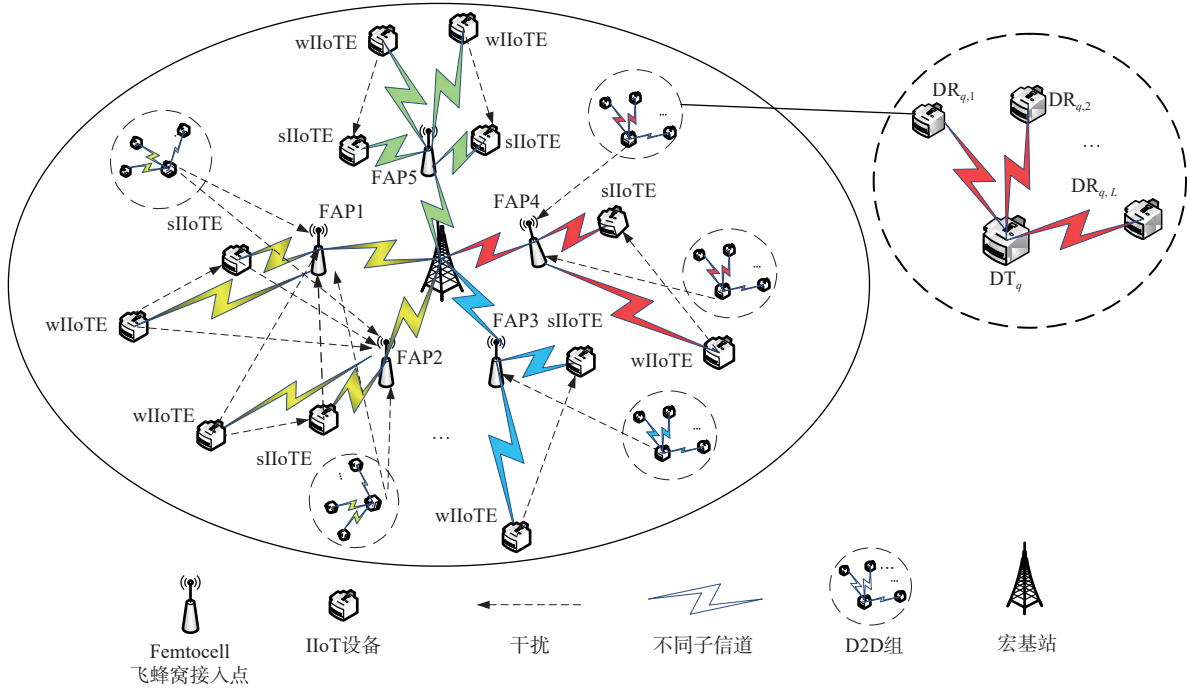


图1 IIoT超密集网络的频谱复用场景

群组指的是单个 D2D 发送器能够经由 NOMA 协议与若干 D2D 接收器通信，这与先前常用的一对一的 D2D 对概念有所不同。它允许若干 D2D 组重用由蜂窝用户占用的相同子信道，以提高频谱利用率。例如，在 Q 个 D2D 群组中，发送设备为 $\{DT_1, DT_2, \dots, DT_q, \dots, DT_Q\}$ ，每一个发送设备 DT_q 都会和 L 个接收设备 $\{DR_{q,1}, DR_{q,2}, \dots, DR_{q,L}\}$ 组合成一组 D2D 群组。

本文重点考虑超密集网络下飞蜂窝基站之间的干扰情况及资源分配问题，因此忽略了宏基站对用户的干扰情况。虽然这样会影响最终得出的设备速率大小，但不会对最优资源分配结果产生影响。

在该条件下，系统存在如下干扰：

- 1) 一个 FAP 覆盖范围内 D2D 群组的发射机和 IIoTE 对共享同一频谱 FAP 的干扰；
- 2) IIoTE 对 D2D 群组接收器发出的干扰（未标出）；
- 3) 一个 D2D 群组的发射机对与其共享相同信道的另一个 D2D 群组的接收机处产生的干扰（未标出）；
- 4) 来自同一 D2D 群组中的 D2D 发射机的叠加信号的干扰（未标出）；
- 5) 解调时，wIIoTE 对 sIIoTE 造成的干扰。

1.2 问题描述

在该系统场景中，定义 p_c 和 p_d 为 IIoTE 和 D2D 发射机的发射功率， p_f 为 FAP f 的发射功率。为了减轻来自 D2D 对的干扰， p_d 需要比 p_c 小得多。传输信道为瑞利衰落信道，信道增益包含路径损耗和归一化小尺度衰落。 $g_{f,n,k}$ 、 $g_{f,m,k}$ 、 $g_{f,q,k}$ 分别表示 sIIoTE、IIoTE、D2D 发射机与 FAP 之间的信道系数。 $|g_{f,n,k}|^2 = |\hat{g}_{f,n,k}|^2 (d_{n,f})^{-\alpha}$ 、 $|g_{f,m,k}|^2 = |\hat{g}_{f,m,k}|^2 (d_{m,f})^{-\alpha}$ 、 $|g_{f,q,k}|^2 = |\hat{g}_{f,q,k}|^2 (d_{q,f})^{-\alpha}$ 。其中， $\hat{g}_{f,n,k}$ 、 $\hat{g}_{f,m,k}$ 、 $\hat{g}_{f,q,k}$ 均是小尺度衰落； $d_{n,f}$ 、 $d_{m,f}$ 、 $d_{q,f}$ 分别是 sIIoTE、wIIoTE、D2D 群组的发射机到对应 FAP 的距离； α 是路径损耗指数。在对 FAP 内的设备进行信道分配时，指示函数的表达式如下：

$$\theta_{f,q}^k \triangleq \begin{cases} 1, & \text{子信道 } k \text{ 分配给 FAP } f \text{ 中的 D2D 组 } q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_{f,m}^k \triangleq \begin{cases} 1, & \text{子信道 } k \text{ 分配给 FAP } f \text{ 中的 } m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_{f,n}^k \triangleq \begin{cases} 1, & \text{子信道 } k \text{ 分配给 FAP } f \text{ 中的 } n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在上行链路期间，基站端配置了带有 SIC 技术的接收机。设备受到的干扰主要来自信道条件好的强设备，因为信道条件差的弱设备容易受到其他强设备的干扰，所以系统优先对信道条件好的强设备

进行解码。SIC技术的基本原理是采用逐级干扰消除策略：接收机先根据用户功率或信道质量进行分级排序，随后对接收到的叠加信号中功率最强或信道质量最好的用户逐个进行判决与幅度恢复；再将该用户信号产生的多址干扰从接收信号中删除；对剩余信号重复上述判决、重建与消除过程，再依次处理下一级用户，直至消除所有的多址干扰，进而完成对所有用户信号的正确解调。

第 k 个子信道上的 sIIoTE 与 wIIoTE 接收信号如下：

$$y_{\text{sIIoTE}} = \sqrt{p_c} g_{f,n,k} x_{f,n} + \sqrt{p_c} g_{f,m,k} x_{f,m} + \sum_{f' \in F, f' \neq f} \chi_{f,f',n} \sqrt{p_{f'}} g_{f',n,k} x_{f',n} + \sum_{f' \in F} \chi_{f,f',q} \sqrt{p_d} g_{f',q,k} x_{f',q} + \vartheta \quad (4)$$

$$y_{\text{wIIoTE}} = \sqrt{p_c} g_{f,m,k} x_{f,m} + \sum_{f' \in F, f' \neq f} \chi_{f,f',m'} \sqrt{p_{f'}} g_{f',m',k} x_{f',m'} + \sum_{f' \in F} \chi_{f,f',q} \sqrt{p_d} g_{f',q,k} x_{f',q} + \vartheta \quad (5)$$

其中， $x_{f,n}$ 、 $x_{f,m}$ 、 $x_{f,q}$ 分别是 sIIoTE、wIIoTE、D2D 群组发射机的传输信号。当 FAP f' 中的 sIIoTE n 与 FAP f 中的 sIIoTE n 共享同一子信道时， $\chi_{f,f',n} = 1$ ；否则， $\chi_{f,f',n} = 0$ 。当 f' 里第 q 个 D2D 群与 FAP f 中的 sIIoTE n 共享同一子信道时， $\chi_{f,f',q} = 1$ ；否则， $\chi_{f,f',q} = 0$ 。 ϑ 为加性高斯白噪声。

当叠加信号到达 FAP 的 SIC 接收机时，先对 sIIoTE 信号进行解码。若 $\theta_{f,n}^k = 1$ ，则此时接收信号的信噪比为：

$$\gamma_{f,n,k} = \frac{p_c |g_{f,n,k}|^2}{I_{\text{SIC}}^{n,m} + I_{\text{CoC}}^n + I_{\text{D2D}} + \sigma^2} \quad (6)$$

$$I_{\text{SIC}}^{n,m} = \sum_{m' \neq m, m' \in E} p_c |g_{f,m',k}|^2 \quad (7)$$

$$I_{\text{CoC}}^n = \sum_{f' \in F, f' \neq f} p_c |g_{f',n,k}|^2 \quad (8)$$

$$I_{\text{D2D}} = \sum_{f' \in F} p_d |g_{f',q,k}|^2 \quad (9)$$

其中， $I_{\text{SIC}}^{n,m}$ 表示在使用 SIC 过程中 wIIoTE 对 sIIoTE 的干扰； I_{CoC}^n 表示 sIIoTE 对共享同一频谱的 sIIoTE 的干扰； I_{D2D} 表示一个 D2D 群组的发射机对与其共享相同信道的另一个设备的干扰。

当 sIIoTE 解码完成后，将其从叠加信号中减去，并对同一簇的 wIIoTE 信号进行解调。此时，若 $\theta_{f,m}^k = 1$ ，则此接收信号的信噪比为：

$$\gamma_{f,m,k} = \frac{p_c |g_{f,m,k}|^2}{I_{\text{D2D}} + I_{\text{CoC}}^m + \sigma^2} \quad (10)$$

其中，

$$I_{\text{CoC}}^m = \sum_{f' \in F, f' \neq f} p_c |g_{f',m',k}|^2 \quad (11)$$

以此类推，直至此 FAP 内所有设备解码完毕。

同时，D2D 群组的接收机在解码时，类似地遵循 NOMA 的解码规则。规定在某一个 FAP f 内的 Q 个 D2D 群组中， DT_q 与 $DR_{q,l}$ 之间的信道系数为 $g_{f,l,q}^k$ 。不失一般性，将这些信道系数按升序排序为 $|g_{f,1,q}^k|^2 < |g_{f,2,q}^k|^2 < \dots < |g_{f,l,q}^k|^2$ ； $g_{f,e,l,q}^k$ 为 $DR_{q,l}$ 与设备 e 之间的信道系数； $g_{f,q',q,l}^k$ 为其他 D2D 群组的发射机 $DT_{q'}$ 与此群组的接收机 $DR_{q,l}$ 之间的信道系数。

接收设备的功率分配系数按降序进行排序：

$$\beta_{q,1} > \beta_{q,2} > \dots > \beta_{q,L}, \sum_{l=1}^L \beta_{q,l} = 1. \quad \text{此时，可以类似}$$

地将 SIC 解码技术运用到 D2D 群组的解码中。具体而言，如果 $j < e < i$ ，则第 e 个用户可以解码第 j 个用户的消息，并将第 i 个用户的消息视为干扰。即第 e 个用户先对所有信道增益低于的 $e-1$ 个用户的消息进行解码，然后依次删除这些消息，再对自己进行解码。

因此，第 k 个子信道上的第 q 个 D2D 中的第 l 个接收机接收信号如下：

$$y_{\text{D2D}} = g_{f,l,q}^k \sum_{r=1}^{L_q} \sqrt{\beta_{q,r}} p_d x_{f,q,r} + \sum_{f' \in F} \chi_{f,f',e'} \sqrt{p_c} g_{f',e',l,q}^k x_{f',e'} + \sum_{f' \in F} \chi_{f,f',q'} \sqrt{p_d} g_{f',q',q,l}^k x_{f',q'} + \vartheta \quad (12)$$

若 $\theta_{f,q}^k = 1$ ，此 D2D 群组的第 $l+1$ 个接收机接收到的、用于解码第 l 个接收机信号的信噪比为：

$$\gamma_{f,q,l+1}^k = \frac{p_d |g_{f,l+1,q}^k|^2 \beta_{q,l}}{I_E^q + I_{\text{in}}^q + I_{\text{out}}^q + \sigma^2} \quad (13)$$

其中，

$$I_E^q = \sum_{f' \in F} p_c |g_{f',e,l+1,q}^k|^2 \quad (14)$$

$$I_{\text{in}}^q = p_d |g_{f,l+1,q}^k|^2 \sum_{i=l+1}^L \beta_{q,i} \quad (15)$$

$$I_{\text{out}}^q = \sum_{q' \neq q} p_d |g_{f',q',q,l+1}^k|^2 \quad (16)$$

注意到第 q 个 D2D 组的第 L 个接收器可以对同一组中所有其他接收器的信号进行译码，从而将信干噪比表示为：

$$\gamma_{f,q}^{L,k} = \frac{p_d |g_{f,L,q}^k|^2 \beta_{q,L}}{I_E^q + I_{\text{out}}^q + \sigma^2} \quad (17)$$

基于以上公式，各设备的速率由式(18)~式(20)定义：

$$r_{f,m}^k = \text{lb}(1 + \gamma_{f,m,k}) \quad (18)$$

$$r_{f,n}^k = \text{lb}(1 + \gamma_{f,n,k}) \quad (19)$$

$$r_{f,q}^k = \sum_{l=1}^{L-1} \text{lb}(1 + \gamma_{f,q,l}^{l,k}) + \text{lb}(1 + \gamma_{f,q}^{L,k}) \quad (20)$$

因此, 该频谱复用的优化问题可以描述为:

$$\text{OP1: } \max \sum_{f \in F} \sum_{m,n,q \in K} (\theta_{f,m}^k r_{f,m}^k + \theta_{f,n}^k r_{f,n}^k + \theta_{f,q}^k r_{f,q}^k) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} C_1: \theta_{f,m}^k \leq 1 \\ C_2: \theta_{f,n}^k \leq 1 \\ C_3: \theta_{f,p}^k \leq 1 \\ C_4: \gamma_{f,m,k} \geq \gamma_{f,m,k}^{\text{thre}} \\ C_5: \gamma_{f,n,k} \geq \gamma_{f,n,k}^{\text{thre}} \\ C_6: \gamma_{f,q,l}^{l,k} \geq \gamma_{f,q,l}^{\text{thre}} \end{cases}$$

优化目标为最大化速率。

其中, 约束 C_1 、 C_2 、 C_3 代表着一个设备或 D2D 群组最多分配一个子信道; 约束 C_4 、 C_5 、 C_6 代表着为了保证可靠传输及解码的顺利进行, D2D 群组的接收端和基站端的信干噪比需要分别满足 $\gamma_{f,m,k} \geq \gamma_{f,m,k}^{\text{thre}}$, $\gamma_{f,n,k} \geq \gamma_{f,n,k}^{\text{thre}}$, $\gamma_{f,q,l}^{l,k} \geq \gamma_{f,q,l}^{\text{thre}}$ 。其中, $\gamma_{f,m,k}^{\text{thre}}$, $\gamma_{f,n,k}^{\text{thre}}$, $\gamma_{f,q,l}^{\text{thre}}$ 是满足解码条件的最小信噪比。

OP1 是一个具有非线性约束的 NP 难组合优化问题。接下来本文将其描述为超图理论中的最大团问题, 并利用文献[23]中基于超图-最大团的资源分配算法来解决该问题。

2 超图的构建与问题的解决

2.1 超图概述

超图是一种在图论中广泛应用的扩展图结构, 它在边的定义上比传统的图更加灵活。在超图中, 边的定义不再局限于连接两个节点, 而是可以连接任意数量的节点。这一特性使得超图能够更好地描述复杂系统中元素之间的关系。

在超图中, 每个节点代表一个元素或对象, 而超边则表示这些元素之间的关联。例如, 在社交网络中, 每个节点可以代表一个用户, 超边可以代表一组共同的兴趣或关系; 而在知识图谱中, 节点可以是概念或实体, 超边则表示它们之间的语义关系^[28-29]。

定义 1 超图可以由其关联矩阵来确定。关联矩阵的每一列代表一个超边, 每一行代表一个顶点。如果顶点 x_i 与边 e_j 关联, 则矩阵中的 (i, j) 项为 1, 否则为 0^[30]。

定义 2 定义一个节点 f 的邻域集为 $N(f)$, 它代表所有与 f 在同一边的节点的集合, 且 $N^+(f) = N(f) \cup \{f\}$ 。

定义 3 定义节点 f 的度为 d_f , 它代表着节点 f 所在边的个数。

2.2 超图的构建

在构建超图时, 定义了两种边模拟来自信道重用的干扰: 第一种是成对边; 第二种是超边。成对边用于测量共享相同信道的两个设备的独立干扰, 独立干扰源对 FAP 具有较小的信道衰减; 而超边被构造用于测量累积干扰, 累积干扰对 FAP 具有较大的信道衰减。按照算法 1 的步骤构造超图^[23]。

算法 1 干扰权重超图的构建

输入 FAP 集合 F

1. 通过式 (22) 搜寻 FAP f 的邻域集 U_f
2. 对于所有的 $f_i, f_j \in U_f$
3. 如果它们满足式(23), 那么
4. 建立边 (f_i, f_j)
5. 将 f_i 与 f_j 从 U_f 中删除, 更新 U_f 为 U_{2f}
6. 对于所有的 $f_i, f_j \in U_{2f}$ 和 f
7. 如果它们满足式(24), 那么
8. 建立超边 (f, f_i, f_j)

输出 超图 $G(V, E)$

首先, 对于一个给定的 FAP f 需要设定其邻域集 U_f , 在以该 f 为圆点、半径 r 内所有的 FAP 都作为可能构建边的顶点, 即如果满足

$$\sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2} < r, i = 1, 2, \dots, F, i \neq f \quad (22)$$

则第 i 个 FAP 就会被纳入 f 的邻域集中。其中, (x_f, y_f) 是 f 相对于宏基站 (原点) 的坐标, (x_i, y_i) 是第 i 个 FAP, 相当于宏基站的坐标。 r 的设置不宜过大也不宜过小, 过大会造成系统效率过低, 过小则会导致难以建立边。

接着, 将邻域集里除了 f 的任意两个 FAP 作为两个顶点, 如果这两个顶点满足

$$\frac{\sum_{k=1}^K p_c |g_{f_i, m, k}|^2}{\sum_{k=1}^K p_c |g_{f_j, m, k}|^2} < \eta_1, f_i, f_j \in U_f \quad (23)$$

则这两个顶点形成一对成对边 (f_i, f_j) 。其中, η_1 是阈值。如果这两个顶点形成了成对边, 则这两个 FAP 不能共享相同的子信道, 否则会对给定的 FAP 内的设备造成较大的干扰。已经存在于两顶点边中的 FAP 不可参与多顶点超边的构造。因此, 在构造了两个顶点的边之后, 将它们从邻域集中移除。

最后, 在给定的 FAP 的剩余相邻集合 U_{2f} 中,

如果有两个FAP满足

$$\frac{\sum_{k=1}^K p_c |g_{f,m,k}|^2}{\sum_{k=1}^K p_c |g_{f_i,m,k}|^2 + \sum_{k=1}^K p_c |g_{f_j,m,k}|^2} < \eta_2, f_i, f_j \in U_{2f} \quad (24)$$

则它们形成超边 (f, f_i, f_j) 。其中, η_2 是阈值。该阈值设置得越高, 说明在构建完的超边中, 邻域内其他FAP产生的累计干扰就越大。为了降低计算的复杂度, 本文暂且只考虑3个顶点的超边情况。于此就得到了含有边与超边的超图 $G(V, E)$ 。

2.3 基于超图的核心定义

定义1 定义一个超图 G , 若另一个超图 G' 与 G 有着相同的节点, 且有着 G' 不存在的所有超边, 则 G' 称为 G 的补超图。在实际应用时, 所求的超图中同一条超边和边所连接的节点代表着这些FAP共享频谱会产生较大的干扰, 对其求补图即可有效避免这些顶点共享频谱。

定义2 一个超图的完全子图(即任意两个顶点之间都存在边或超边相连)称为该超图的超团。如果某个超团不能被其他任何超团所包含, 则称其为极大超团。拥有顶点数最多的极大超团便是该超图的最大超团。通过相应算法在补超图上求得的最大超团, 即为某一信道的最佳频谱分配方案。

定义3 定义顶点权重 $W_f = r_{f,m}^k + r_{f,n}^k + r_{f,q}^k$, 即为一个顶点FAP内设备的速率和。上述对FAP进行频谱分配的优化问题等价于求得的最大超团的顶点权重之和。

2.4 算法设计与分析

2.4.1 基于超图的最大顶点权重团算法

算法2 基于超图的最大顶点权重团算法

输入 超图 G

1. 定义 A 为一个团, S 为超图 G 的节点中不在 A 中的节点的集合

2. 建立超图 G 的补图 G'

3. 设定初值, $A = \emptyset, S = \{1, \dots, f, \dots, F\}, z = 0$

4. 重复以下操作

5. 定义集合 $B \subseteq S$, 将集合 S 中满足下列不等式的元素放入集合 B 中:

$$R = W_f + \sum_{f_j \in A} w_{ij} > 0$$

6. 通过下式在 B 中得到最优解节点 f^* :

$$f^* = \arg \max_{f \in B} (W_f / (1 + d_{G'(f)}))$$

7. 更新 $A = A \cup \{f^*\}, S_{z+1} = S_z \setminus \{f^*\}$,

$$G'_{z+1} = G'_z \setminus \{N^+(f^*)\}, z = z + 1$$

8. 直到 $B = \emptyset$

输出 最大顶点权重团 A

算法1将宏小区内的FAP作为节点、独立干扰和累计干扰作为边和超边建立超图。根据已经建立的超图得到对应的邻接矩阵和其补图。算法2的目标是得到超图的最大顶点权重团, 其实现路径是先将团的初始解 A 设置为空来存放每一次循环的结果, 并在每一次循环的过程中将所有不在 A 中的剩余顶点放入集合 S 中。设置 S 的子集 B , 其中的元素均需要满足 $W_f + \sum_{f_j \in A} w_{ij} > 0$ 。 w_{ij} 是一个惩罚函数, 当 i, j 满足 f_i, f_j 属于超图 G 的同一条超边时, $w_{ij} = P$, P 是一个足够小的惩罚标量, 这里 $P = -1 \times 10^7$; 否则, $w_{ij} = 0$ 。这样保证了选取的顶点之间不会产生较大的干扰。接着, 在 B 中选取能使 $W_f / (d_{G'(f)} + 1)$ 最大化的顶点 f^* , 确保顶点权重最大化。最后, 更新集合 A, S, G 和 z , 并进行下一次循环, 直到 B 为空。至此就可以得到最大顶点权重团 A , 将 A 中元素对应的 R 求和, 即等价于最佳优化方法。

2.4.2 算法复杂度分析

由于在构建超图时考虑了包含3个顶点的超边, 且式(23)和(24)需要考虑所有子信道的情况, 因此算法1的时间复杂度为 $O(F^3K)$ 。同时, 在算法2中经历了 $F-Z$ 次循环, 其中 Z 为算法2结束时 z 的值, 而每次循环都会遍历 S 中的 $F-z$ 个元素, 并计算每个元素在信道 k 下的速率、 $|A|$ 个惩罚函数以及对应 R 值, 从而得到 B 。接着遍历 B 中的 $|B|$ 个元素寻求最优节点。因此, 算法2的时间复杂度约为 $O(F^2KZ)$ 。文献[18]中的最大权重算法时间复杂度为 $O(F^3K^2)$, 对比之下, 本文提出的算法在复杂度上有了显著的提升。

3 仿真与结果分析

在本节中, 将所提出的NOMA-超图-D2D群组的优化方案与其他资源分配方法在频谱效率上进行比较。这些方案包括:

1) NOMA-超图方案^[23], 即使用NOMA作为多址接入技术, 并用超图进行资源分配优化。

2) OFDMA-超图方案^[18], 即使用OFDMA作为多址接入技术, 并用超图进行资源分配优化。

3) NOMA-图方案，即干扰图的一条边仅包含两个顶点，意味着在资源分配时仅考虑共享同一信道的两个设备之间的独立干扰，并使用NOMA作为多址接入技术。

4) OFDMA-图方案，即干扰图的一条边仅包含两个顶点，意味着在资源分配时仅考虑共享同一信道的两个设备之间的独立干扰，并使用OFDMA作为多址接入技术。

在仿真时，为了降低复杂度，设定所有蜂窝用户或者D2D群组的发射机具有相同的发射功率，并且所有D2D群组有着相同数量的接收器。每个D2D群组内含有两个接收机，功率分配系数分别为0.6和0.4^[22]。若在一个FAP内有设备无法满足NOMA的配对条件，将其用OFDMA进行计算。本文的仿真架构和算法实现均在Matlab 2016a环境下进行，仿真参数见表1。

表1		仿真参数
参数	值	
宏基站半径	500 m	
飞蜂窝半径	20 m	
D2D对最大距离	5 m	
D2D设备信噪比阈值	1.3 dB	
设备信噪比阈值	2 dB	
噪声谱密度	-174 dBm/Hz	
路径损耗指数	4	
设备传输功率	23 dBm	
D2D群组传输功率	13 dBm	
成对边形成阈值(η_1)	10 dB	
超边形成阈值(η_2)	8 dB	
邻域集半径阈值(r)	60 m	

在给定的条件下（共450个设备， $r=60$ ），系统的频谱效率和FAP数量的关系如图2所示。可以看出，频谱效率随着FAP的数量增加而降低，直至趋于稳定。这是因为在总信道带宽不变的条件下，FAP数量的增加会导致每个团分到的子信道减少，并且每个FAP内设备所受干扰也可能增强。在每次实验中，本文提出的方案仍然优于其他方案，这是因为实验条件下NOMA性能优于OFDMA，而基于超图的最优化方案进一步抑制了干扰。即使仅含2个接收机的D2D群组，也已经能显著提高频谱利用率。此外，在FAP数量较多，即在密集网络环境下时，基于超图的优化方案优势更加明显。例如，OFDMA-超图方案一开始劣于NOMA-图的方案，

可当FAP数量上升时，OFDMA-超图方案逐渐优于NOMA-图方案，进一步说明超图方案有助于降低频谱间干扰。

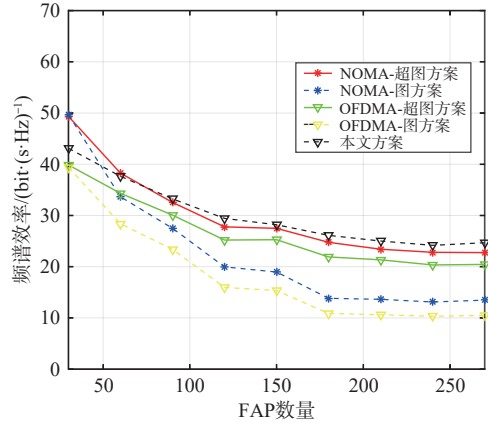


图2 频谱效率和FAP数量的关系

在给定的条件下（90个FAP， $r=60$ ），频谱效率和IloTE数量的关系如图3所示。在实际情况下，每个FAP内的用户数量有限，一般不超过8个，因此，图中设备数量更具有参考意义。从图3可以看出，其他条件不变，随着设备数量的增加，系统总的频谱效率随之增长，增长速率在整体上来看呈先快后慢的趋势，但基于本文的优化方案依然优于其他方案。这说明，超密集网络下可以支持众多设备的接入，但这个数量是有限的。

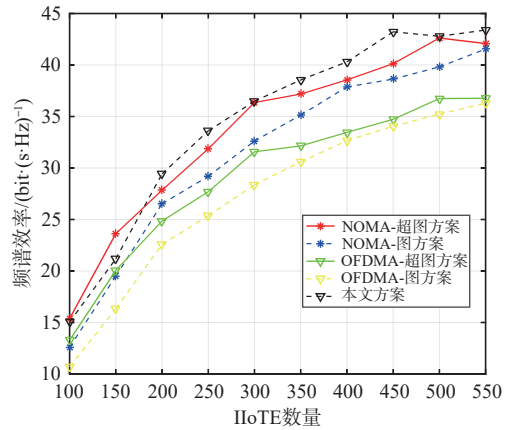


图3 频谱效率和IloTE数量的关系

在给定的条件下（90个FAP，450个设备），频谱效率和邻域集半径阈值(r)的关系如图4所示。从图4可以明显看出，5种方案的频谱效率的总体趋势是不断上升的。这是因为基于图和基于超图的方案中，更多的顶点被纳入可能成为干扰的集合中，就意味着，虽然计算的复杂度增加了但更多的

边与超边被建立, 因此通过补图和最大团算法能够避免更多会造成较大干扰的FAP共享频谱。同时, 当 r 不断增大, 频谱效率增长有时会变得缓慢, 这是因为距离的增加, 即使邻域集的元素变多了, 但并不满足构建边与超边的条件。

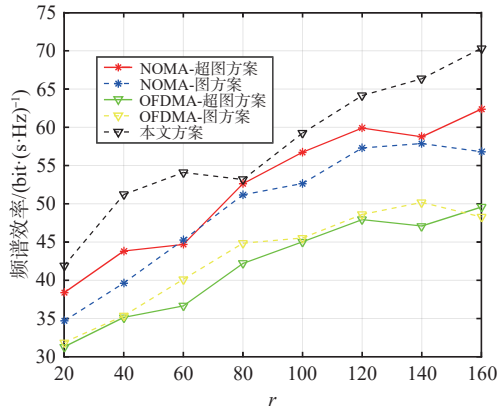


图4 频谱效率和邻域集半径阈值 r 的关系

同理, 频谱效率和超边形成阈值(η_2)的关系如图5所示。随着 η_2 的增加, 基于超图方案的系统频谱效率也在增加。这是因为超边的增加会避免更多的累计干扰, 所以频谱效率也会增加。

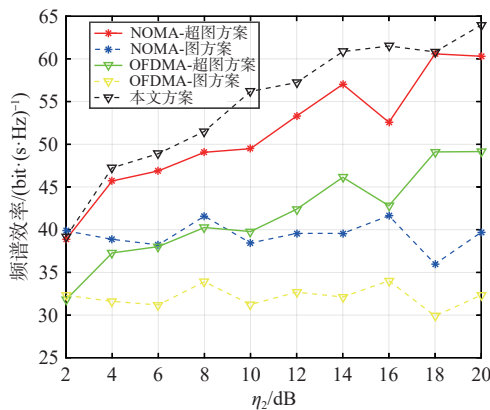


图5 频谱效率和 η_2 的关系

基于超图的资源分配方案中, 频谱效率和D2D群组个数关系如图6所示。从图6可以看出, 总频谱效率随D2D组的数量增加而增加, 这说明了更多D2D组有助于系统更加高效率地利用网络资源。

4 结束语

在工业物联网场景下, 本文研究了超密集网络的频谱分配方案。首先, 考虑配有众多飞蜂窝基站的宏小区场景, 在每个飞蜂窝基站内配有若干个设

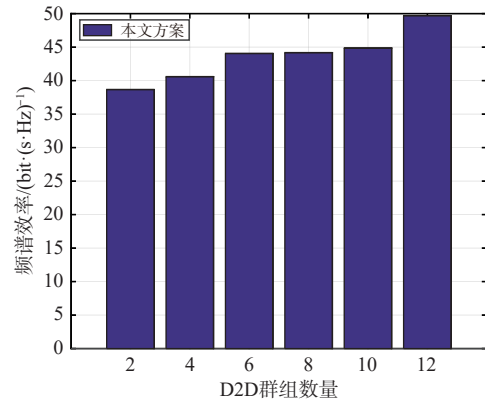


图6 频谱效率和D2D群组个数关系

备及D2D群组, 并使用非正交多址技术进行传输。接着, 将频谱分配的最优化方案归结为一个混合整数规划问题。在解决该问题时, 使用超图来建立超密集网络环境下微基站之间的干扰关系, 并提出一种基于超图的最大顶点权重团算法。最后, 仿真实验表明, 本文所提方案能够有效提高系统的频谱效率。

参考文献:

- [1] 罗梓琿, 江呈羚, 刘亮, 等. 基于深度强化学习的智能车间调度方法研究[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 53-64.
LUO Z H, JIANG C L, LIU L, et al. Research on deep reinforcement learning based intelligent shop scheduling method[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 53-64.
- [2] DUAN G Y, GUO Y C, PENG T, et al. A neural-network-based up-link interference identification algorithm for ultra-dense networks[C]// Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [3] CHOWDHURY M Z, BUI M T, JANG Y M. Neighbor cell list optimization for femtocell-to-femtocell handover in dense femtocellular networks[C]// Proceedings of the 2011 Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2011: 241-245.
- [4] ERTÜRK M C, GÜVENC I, ARSLAN H. Femtocell gateway scheduling for capacity and fairness improvement in neighboring femtocell networks[C]// Proceedings of the 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2010: 54-59.
- [5] WANG B C, WANG K, LU Z H, et al. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G[C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [6] DERAZ S A, SOLIMAN M A, ELBASET M A, et al. A comparative study of user pairing techniques of MIMO-NOMA system in different channel models[C]// Proceedings of the 2023 Interna-

- tional Telecommunications Conference (ITC-Egypt). Piscataway: IEEE Press, 2023: 625-628.
- [7] CHAUHAN A, GHOSH S, JAISWAL A. RIS partition-assisted non-orthogonal multiple access (NOMA) and quadrature-NOMA with imperfect SIC[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(7): 4371-4386.
- [8] ZHANG Z K, SUN H J, HU R Q. Downlink and uplink non-orthogonal multiple access in a dense wireless network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(12): 2771-2784.
- [9] SHEN R J, WANG X M, XU Y Y. Weighted sum-rate maximized power allocation in downlink MIMO-NOMA systems[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 679-684.
- [10] 刘金鑫, 张晶, 董俊, 等. 基于干扰抑制区的D2D通信模式选择方案[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(4): 43-50.
LIU J X, ZHANG J, DONG J, et al. D2D communication mode selection based on interference limited area[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2021, 41(4): 43-50.
- [11] MA X Q, LIU J C, JIANG H B. Resource allocation for heterogeneous applications with device-to-device communication underlying cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(1): 15-26.
- [12] LI Y, JIN D P, YUAN J, et al. Coalitional games for resource allocation in the device-to-device uplink underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(7): 3965-3977.
- [13] ZAKI F W, KISHK S, ALMOFARI N H. Distributed resource allocation for D2D communication networks using auction[C]//*Proceedings of the 2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 284-293.
- [14] XUE Y H, YANG Z T, YANG W, et al. D2D resource allocation and power control algorithms based on graph coloring in 5G IoT[C]//*Proceedings of the 2019 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 17-22.
- [15] 王博文. 基于图论与匹配理论的社交物联网资源分配方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
WANG B W. Research on resource allocation method of Social Internet of things based on graph theory and matching theory[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [16] Zhang R Q, Cheng X, Yang L Q, et al. Interference graph based resource allocation (InGRA) for D2D communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(8): 3844-3850.
- [17] 胡弥亨. 基于超图理论的物联网实体关系网络建模[J]. *电脑知识与技术*, 2018, 14(5): 41-43.
HU M H. Modeling of IoT entity relationship network based on hypergraph theory[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2018, 14(5): 41-43.
- [18] LI Z, CHEN S, GUO C L. Location-aware hypergraph coloring based spectrum allocation for D2D communication[C]//*Proceedings of the 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [19] ZHANG H L, JI Y S, SONG L Y, et al. Hypergraph based resource allocation for cross-cell device-to-device communications[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [20] REN Y F, CHUAI G. Low-complexity uplink resource allocation algorithm based on hypergraph clustering for D2D communications[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [21] CHAI J L, FENG L, ZHOU F Q, et al. Energy-efficient resource allocation based on hypergraph 3D matching for D2D-assisted mMTC networks[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [22] ZHAO J J, LIU Y W, CHAI K K, et al. NOMA-based D2D communications: towards 5G[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [23] ZHUANSUN C, YAN K D, ZHANG G X, et al. Hypergraph-based resource allocation for ultra-dense wireless network in industrial IoT[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(9): 2106-2110.
- [24] SINGH K K, GOVINDA L. A simple and efficient heuristic algorithm for maximum clique problem[C]//*Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 269-273.
- [25] WANG Y, HAO J K, GLOVER F, et al. Solving the maximum vertex weight clique problem via binary quadratic programming[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2016, 32(2): 531-549.
- [26] LUO C W, YU J G, YU D X, et al. Distributed algorithms for maximum clique in wireless networks[C]//*Proceedings of the 2015 11th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 222-226.
- [27] REDDY Y S. Solving max-clique using cellular neural network[C]//*Proceedings of the 2005 9th International Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2005: 89-93.
- [28] HOU J, YUAN H Q. Efficient and accurate hypergraph matching[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [29] POTEBNIA A. Creation of the mathematical apparatus for establishing the duality relation between the vertex separators and cuts in hypergraphs[C]//*Proceedings of the 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Infor-*

mation Technologies (CSIT). Piscataway: IEEE Press, 2017: 236-239.

- [30] ONETE C E, ONETE M C C. Graph evolution using oriented incidence matrices[C]//Proceedings of the 2022 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-4.

[作者简介]



王琴(1988-), 女, 博士, 南京邮电大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、工业物联网、低空智联网、频谱智能认知与管理、资源博弈共享优化。



昌昊天(2000-), 男, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为频谱分配、超图理论以及多址接入技术。



朱洪波(1956-), 男, 《物联网学报》执行主编, 南京邮电大学教授、物联网研究院院长, 中国通信学会物联网专业委员会主任, 中国电子学会通信分会主任, 中国(无锡)物联网研究院院长, 主要研究方向为无线通信网络、移动通信与物联网。