

蜂窝网络下同时同频全双工设备到设备组网的干扰协调算法

周阅天^{①②} 邵士海^{*①} 齐飞^② 时成哲^①

^①(电子科技大学通信抗干扰全国重点实验室 成都 611731)

^②(中国电信股份有限公司研究院移动与终端技术研究所 北京 102200)

摘要: 蜂窝网络下的同时同频全双工(CCFD)设备到设备(D2D)组网可以进一步提升网络频谱效率,然而由此引入的残余自干扰(RSI)及蜂窝用户(CU)与D2D用户(DU)之间共享频谱的干扰会严重影响到蜂窝用户的体验。因此,该文为蜂窝网络下同时同频全双工组网设计了两种干扰协调算法,即CU和速率最大化算法(MaxSumCU)与CU最小速率最大化算法(MaxMinCU),在小区频谱效率得到提升的同时尽可能的保证CU的体验。对于MaxSumCU算法,该文以CU和速率为优化目标建立混合整数非线性规划问题(MINLP),其在数学上为非确定性多项式(NP-hard)问题。算法将其分解为功率控制与频谱资源分配两个子问题,并用图形规划找到最优功率解后,使用二向图最大权值匹配算法决定频谱共享的CU与DU。为了保证每一个蜂窝用户体验的公平性,本文设计了MaxMinCU算法用以最大化所有CU速率中的最小值,该算法基于二分查找与二向图最小权值匹配算法来完成用户的资源分配。数值结果表明,与小区和速率最大化(MaxSumCell)设计相比,该文所提的两种算法在提升小区和速率的同时均有效地提升了蜂窝用户的体验。

关键词: 蜂窝网络下设备到设备组网; 同时同频全双工; 二向图最大(小)权值匹配; 公平性算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)00-0001-07

DOI: [10.11999/JEIT240120](https://doi.org/10.11999/JEIT240120)

Interference Coordination Algorithm of Co-frequency and Co-time Full Duplex Device-to-Device underlying Cellular Network

ZHOU Yuetian^{①②} SHAO Shihai^① QI Fei^② SHI Chengzhe^①

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

^②(Institute of Mobile and Terminal Technology, China Telecom Research Institute, Beijing 102200, China)

Abstract: The Residual Self-Interference (RSI) caused by Co-frequency and Co-time Full Duplex Device-to-Device (CCFD-D2D) and the interference introduced by spectrum sharing between D2D User (DU) and Cellular User (CU) lead to a degradation in the quality of experience for CUs. Therefore, the CCFD-D2D underlying cellular system is considered and two algorithms are proposed, that is Maximizing Sum-rate of CU (MaxSumCU) and Maximizing Minimum-rate of CU (MaxMinCU) algorithm, to enhance the experience for CUs while spectral efficiency of the system is improved. For the MaxSumCU algorithm, an optimization problem is investigated to maximize the sum rate of CUs in the system, and formulate it as a Mixed Integer NonLinear Programming problem (MINLP) which is NP-hard in mathematics. MaxSumCU is designed to decompose it into two sub-problems as power control and spectral resource allocation. The power control is solved by geometric programming, and the resource allocation is achieved by employing Kuhn-Munkres algorithm to determine the spectrum sharing pairs of CUs and DUs. To provide a more uniform rate performance across all CUs, the MaxMinCU algorithm is designed to maximize the minimum rate among the CUs. The novel spectrum resource allocation algorithm based on bisection searching and Kuhn-Munkres minimum-weight algorithm is proposed to solve this optimization problem. Numerical results show that, compared with Maximizing Sum-rate of Cell (MaxSumCell) design, our proposed algorithm effectively optimize the CU's experience while improve the spectral efficiency of system in CCFD-D2D underlying cellular networks.

Key words: Device-to-Device (D2D) underlying cellular networks; Co-frequency and Co-time Full Duplex (CCFD); Kuhn-Munkres algorithm; Fairness algorithm.

1 引言

蜂窝网络下设备到设备(Device-to-Device, D2D)组网被视为解决频谱短缺问题的一项有前景的技术。然而,与蜂窝用户共享频谱将引入互干扰,有时会导致系统容量下降而非提高。为了解决这一难题,蜂窝网络下D2D组网引起了学者们对其在干扰管理、资源分配和功率控制等方面的研究兴趣^[1-6]。文献[1]提出了一种基于超图的信道分配方法,旨在最大化小区的总速率,允许多个D2D对与蜂窝用户共享上行信道;而文献[2]则通过基于凸优化的新型分配方法进行下行子载波重用。文献[3]为蜂窝网络下D2D组网的随机网络模型研究了集中式和分布式功率控制算法。文献[4]利用非正交多址通信技术克服蜂窝网络下D2D组网的频谱共享引起的互干扰。上述文献主要关注“一对一”的场景,文献[5]提出了一种联合上行共享和功率分配方案,以最大化“多对多”场景下D2D用户(D2D User, DU)的总速率,其中一个子载波可以被多个DU共享。然而,由于网络允许多个D2D重用相同的子载波,互干扰加剧,可能导致容量下降^[6]。于是,研究更高效的资源协调方案以促进系统性能的提升是一个迫切的问题。

近年来,随着自干扰抑制技术的进步,同时同频全双工(Co-frequency and Co-time Full Duplex, CCFD)技术引起了极大的关注。3级自干扰抑制架构被提出,其包括天线域、模拟域和数字域的干扰抑制技术,自干扰抑制能力可高达125 dB^[7,8]。尽管自干扰抑制能力取得了显著进展,但完全消除残余自干扰(Residual Self-Interference, RSI)仍然很难实现。文献[9]研究了将全双工技术应用于蜂窝网络下D2D组网的基站以提高谱效率,数值结果表明性能收益受到RSI的显著影响。显然,除了自干扰抑制能力之外,RSI的大小还与全双工设备的发射功率有关,低发射功率会减小RSI。由于D2D是一种低发射功率的短距离通信技术,因此自然的想到将全双工技术应用到D2D设备之上。

与半双工的D2D通信相比,同时同频全双工D2D(Full Duplex-Device to Device, FD-D2D)有使频谱效率倍增的潜力,并能显著降低时延,因此近年来有一些研究将重点转向蜂窝网络下FD-D2D的组网(以下简称FD-D2D组网)。文献[10]研究了最基本的场景,即1对FD-D2D用户和1个蜂窝用户的组网情况。文献[11-13]研究了蜂窝网络下FD-D2D组

网的多用户场景。以上文献均表明,在各自场景中FD-D2D组网比传统D2D组网带来了更大的容量增益。

然而,上述文献通常集中在小区容量最大化设计上,而忽略了蜂窝用户的性能。在小区容量最大化设计中,资源和功率分配往往对蜂窝用户(Cellular User, CU)不公平,加上引入的干扰导致CU的性能进一步恶化。特别在FD-D2D组网中,由于DU的增益更大,基站为了实现整个小区更高的容量会倾向为DU分配更多资源。因此,本文提出了两种有效的算法,确保在蜂窝网络下FD-D2D组网的多用户场景中蜂窝用户的性能,主要贡献如下:

(1) 对于第1种算法设计,本文以最大化全体CU的性能为优化目标,分别用图形规划和二向图最大权值匹配完成最优功率控制和频谱资源分配从而求得近似最优解。

(2) 对于第2种算法设计,本文基于二分搜索和二向图最大权值算法提出了一种公平性资源分配算法,最大化了所有CU中的最小速率。

(3) 本文算法均在DU联合共享CU上、下行频谱的场景下设计,对比单边共享的场景可以避免频谱浪费。

2 系统模型

本文只关注仅包含FD-D2D用户(以下DU均指FD-D2D用户)和CU的蜂窝小区。系统模型如图1所示,用随机分布的DU与CU分别用 DU_i 与 CU_j 表示,其中 $i \in D = \{1, 2, \dots, Q\}$, $j \in C = \{1, 2, \dots, P\}$ 。FD-D2D对中的两个不同设备分别表示为 i_1 和 i_2 。此外,本文假设所有CU等量分配完小区的整个载波。为了减少干扰分析的复杂性,本文只考虑DU与CU“一对一”的频谱共享场景。

本文中所使用的信道经历路径损耗、慢衰落和快衰落。以 CU_j 和基站之间的信道为例,其增益被记为 $g_{j,B}$,可建模为

$$g_{j,B} = G\beta_{j,B}\Gamma_{j,B}l_{j,B}^{-\alpha} \quad (1)$$

其中, G 表示路径损耗常数; $\beta_{j,B}$ 表示快速衰落的增益,服从指数分布; $\Gamma_{j,B}$ 表示慢衰落的增益,服从对数分布; α 表示路径损耗指数, $l_{j,B}$ 表示 CU_j 到基站之间的距离。特别的,FD-D2D对中的两个设备同时同频双向传输,因此两个方向的信道增益被认为相同,均可记为 $g_{i,i}$ 。

为表示 DU_i 与 CU_j 共享频谱的配对关系,本文引入二元变量 $\rho_{i,j}$ 作为配对标识。当 DU_i 与 CU_j 共享

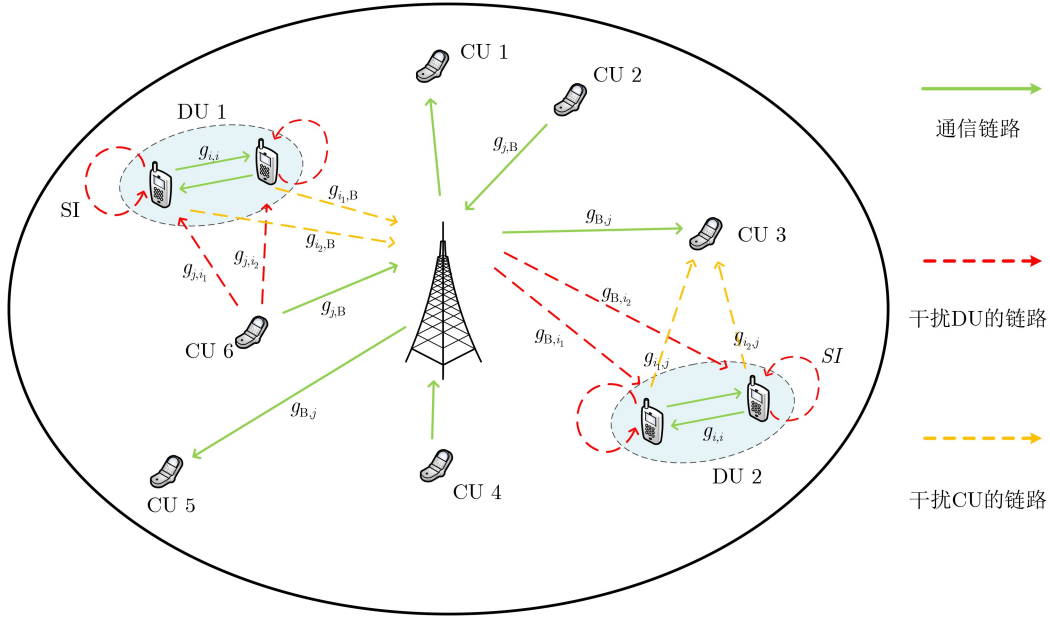


图 1 蜂窝网络下FD-D2D组网系统模型干扰分析示意图

频谱时 $\rho_{i,j} = 1$, 否则 $\rho_{i,j} = 0$ 。 $\rho_{i,j}^u$ 表示共享CU的上行子载波, $\rho_{i,j}^d$ 表示共享CU的下行子载波。在上行频谱共享时, CU_j 与 DU_i 的信干噪比(Signal Interference Noisy Ratio, SINR)分别可以表示为

$$\gamma_j^u = \frac{p_j g_{j,B}}{\sum_{i=1}^Q \rho_{i,j}^u p_i (g_{i_1,B} + g_{i_2,B}) + N_0} \quad (2)$$

$$\gamma_{i_1}^u = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=1}^P \rho_{i,j}^u (p_j g_{j,i_1} + p_i \cdot \eta) + N_0}$$

$$\gamma_{i_2}^u = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=1}^P \rho_{i,j}^u (p_j g_{j,i_2} + p_i \cdot \eta) + N_0} \quad (3)$$

其中, p_j 与 p_i 分别表示 CU_j 与 DU_i 的发射功率; η 代表自干扰抑制能力; N_0 表示零均值加性白高斯噪声的方差。相对的, 在下行频谱共享时, CU_j 和 DU_i 的SINR可以表示为

$$\gamma_j^d = \frac{p_{B,j} g_{B,j}}{\sum_{i=1}^Q \rho_{i,j}^d p_i (g_{i_1,j} + g_{i_2,j}) + N_0} \quad (4)$$

$$\gamma_{i_1}^d = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=1}^P \rho_{i,j}^d (p_{B,j} g_{B,i_1} + p_i \cdot \eta) + N_0}$$

$$\gamma_{i_2}^d = \frac{p_i g_{i,i}}{\sum_{j=1}^P \rho_{i,j}^d (p_{B,j} g_{B,i_2} + p_i \cdot \eta) + N_0} \quad (5)$$

其中, $p_{B,j}$ 表示基站分配给 CU_j 的发射功率。

因此, CU_j 与其对应的 DU_i (包含 DU_{i_1} 与 DU_{i_2}) 在上、下行共享频谱的场景下可达速率分别表示为

$$R_j^u = \log_2(1 + \gamma_j^u) \quad (6)$$

$$R_j^d = \log_2(1 + \gamma_j^d) \quad (7)$$

$$R_{i_1}^u = \log_2(1 + \gamma_{i_1}^u), \quad R_{i_2}^u = \log_2(1 + \gamma_{i_2}^u) \quad (8)$$

$$R_{i_1}^d = \log_2(1 + \gamma_{i_1}^d), \quad R_{i_2}^d = \log_2(1 + \gamma_{i_2}^d) \quad (9)$$

3 蜂窝用户和速率最大化设计

3.1 问题建模

小区中的CU要么在做上行业务, 要么在做下行业务, 为了方便符号标记, 本文以 $R_j = \alpha_j R_j^u + (1 - \alpha_j) R_j^d$ 表示小区中 CU_j 的速率, 其中 $\alpha_j \in \{0, 1\}$ 是上、下行业务标识, 即在 $\alpha_j = 1$ 时 CU_j 为上行蜂窝用户, 否则为下行蜂窝用户。由此, 为了得到最大的CU和速率, 此优化为题可以公式化为P1。P1中约束条件C1与C2保证了CU与DU满足最小的接入速率, 从而保证了服务质量, 其中 $\gamma_j^{u, \text{req}}$, $\gamma_j^{d, \text{req}}$ 与 γ_i^{req} 分别表示CU上、下行与DU的最小要求SINR。约束条件C3-C5强调了功率限制, 其中 p_i^{max} , p_j^{max} 与 $p_{B,j}^{\text{max}}$ 分别表示DU, CU与基站发射功率的最大值。约束条件C6和C7保证了CU与DU“一对一”的子载波共享方案。

$$\begin{aligned}
\text{P1: } & \max_{\rho_{i,j}, p_i, p_j, p_{B,j}} \sum_{j=1}^P R_j \\
\text{s.t. C1: } & \gamma_j^u \geq \gamma_j^{u, \text{req}}, \quad \gamma_j^d \geq \gamma_j^{u, \text{req}}, \quad \forall j \in C \\
\text{C2: } & \gamma_{i_1}^u, \gamma_{i_2}^u, \gamma_{i_1}^d, \gamma_{i_2}^d \geq \gamma_i^{\text{req}}, \quad \forall i \in D \\
\text{C3: } & 0 \leq p_i \leq p_i^{\text{max}}, \quad \forall i \in D \\
\text{C4: } & 0 \leq p_j \leq p_j^{\text{max}}, \quad \forall j \in C \\
\text{C5: } & 0 \leq p_{B,j} \leq p_{B,j}^{\text{max}}, \quad \forall j \in C \\
\text{C6: } & \sum_{i=1}^Q \rho_{i,j}^d + \rho_{i,j}^u \leq 1, \quad \rho_{i,j}^d, \rho_{i,j}^u \in \{0, 1\}, \\
& \forall j \in C \\
\text{C7: } & \sum_{i=1}^P \rho_{i,j}^d + \rho_{i,j}^u \leq 1, \quad \rho_{i,j}^d, \rho_{i,j}^u \in \{0, 1\}, \\
& \forall i \in D
\end{aligned} \tag{10}$$

显然P1是一个混合整数非线性规划问题，本方法将他解耦成功率控制与资源分配两个子问题P2与P3，分别求出最优解。

3.2 功率控制

在功率控制步骤中，本方法简化并分解了原始优化问题P1，形成了一个只关注1组配对 $\text{CU}_j - \text{DU}_i$ 中 CU_j 速率最大化的优化问题P2，其公式化表达为

$$\begin{aligned}
\text{P2: } & \max_{\rho_{i,j}, p_i, p_j, p_{B,j}} R_{i,j}^C \\
\text{s.t. C1: } & \gamma_j^u \geq \gamma_j^{u, \text{req}}, \quad \gamma_j^d \geq \gamma_j^{u, \text{req}}, \quad \forall j \in C \\
\text{C2: } & \gamma_i^u, \gamma_i^d \geq \gamma_i^{\text{req}}, \quad \forall i \in D \\
\text{C3: } & 0 \leq p_i \leq p_i^{\text{max}}, \quad \forall i \in D \\
\text{C4: } & 0 \leq p_j \leq p_j^{\text{max}}, \quad \forall j \in C \\
\text{C5: } & 0 \leq p_{B,j} \leq p_{B,j}^{\text{max}}, \quad \forall j \in C
\end{aligned} \tag{11}$$

其中， $R_{i,j}^C$ 表示 $\text{CU}_j - \text{DU}_i$ 配对中 CU 的速率。由于D2D是短距离通信，因此本方法设定 CU_j 与基站到FD-D2D对中点的信道增益分别为 $g_{j,i}$ 与 $g_{B,i}$ ，并给出假设 $g_{j,i} = g_{j,i_1} = g_{j,i_2}$, $g_{B,i} = g_{B,i_1} = g_{B,i_2}$ 。该假设把基站与 CU 对FD-D2D对中两个设备的干扰信道增益设定成相同大小，均等于到两设备中点的信道增益，避免在图形规划中出现2次项。基于以上假设，式(3)和式(5)中可不区分 i_1 与 i_2 ， DU 共享 CU 上、下行频谱场景下的信噪比可分别记为 γ_i^u 和 γ_i^d 。同样的，式(8)和式(9)中 DU 的速率计算也不区分 i_1 与 i_2 ，分别记为 R_i^u 与 R_i^d 。

基于以上分析，本方法使用图形规划来求解P2。以上行共享场景为例，根据P2中的约束条件可以绘制出图2，其中 l_1 代表 $\gamma_j^u = \gamma_j^{u, \text{req}}$ ， l_2 代表 $\gamma_i^u = \gamma_i^{\text{req}}$ ， l_3 与 l_4 分别为 $p_j = p_j^{\text{max}}$ 与 $p_i = p_i^{\text{max}}$ 。图2中标识的区域 R 即为 CU_j 与 DU_i 功率控制结果的可行域，本方法需要在其中找到使 $R_{i,j}^C$ 最大化的最优功率解。

对于可行域是图2(b)–图2(d)所示的非空闭集，最优功率解 (p_i^*, p_j^*) 必定落在可行域 R 内，将其代入式(6)可计算得出目标函数 $\max R_{i,j}^{C,u}$ 。在文献[14]中证明了一下两个引理。

引理1 最优功率解中至少1个分量等于其可达到的最大值，即最优解 (p_i^*, p_j^*) 中 $p_i^* = p_i^{\text{max}}$ 或 $p_j^* = p_j^{\text{max}}$ 。

引理2 如果可行域 R 是有界的集合，那么最优功率解 (p_i^*, p_j^*) 只可能出现在可行域的顶点上。

根据上述引理，最优功率解的范围被限制在图2中的 $Y_1 \sim Y_5$ ，而 Y_0 的坐标与 l_1, l_2 的斜率决定了图2中可行域的类型，从而决定了是否有解。这使得我们可以搜索比较该集合中所有解计算出的 $R_{i,j}^{C,u}$ 大小，从而得出最优功率解。同理，也可以得到使 $R_{i,j}^{C,d}$ 最大化的下行共享最优功率解。

3.3 资源分配

并非每一个 CU 都有对应的 DU 与其配对，当 CU 未配对时，应尽最大努力传输，即使用基站能分配给他的最大功率传输。同样以上行频谱共享为例，未配对的 CU_j 速率 $R_j^{u, \text{unp}}$ 的计算为

$$R_j^{u, \text{unp}} = \log_2 \left(1 + \frac{p_j^{\text{max}} g_{j,B}}{N_0} \right) \tag{12}$$

当 CU_j 与 DU_i 配对时，共享频谱引入的干扰会降低 CU_j 的速率，本文把这种速率变化记为 $\Delta R_{i,j}^{C,u} = R_{i,j}^{C,u} - R_j^{u, \text{unp}}$ 。类似的，下行频谱共享场景下的 $R_j^{d, \text{unp}}$ 与 $\Delta R_{i,j}^{C,d}$ 有着类似的定义，可以用与上行相同的方法计算

$$\begin{aligned}
\text{P3: } & \max_{\rho_{i,j}, p_i, p_j, p_{B,j}} \sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^Q (\alpha_j \rho_{i,j}^u \Delta R_{i,j}^{C,u} \\
& + (1 - \alpha_j) \rho_{i,j}^d \Delta R_{i,j}^{C,d}) \\
\text{s.t. C1: } & \sum_{j=1}^P \rho_{i,j}^d + \rho_{i,j}^u \leq 1, \quad \rho_{i,j}^d, \rho_{i,j}^u \in \{0, 1\}, \\
& \forall j \in C \\
\text{C2: } & \sum_{i=1}^Q \rho_{i,j}^d + \rho_{i,j}^u \leq 1, \quad \rho_{i,j}^d, \rho_{i,j}^u \in \{0, 1\}, \\
& \forall i \in D \\
\text{C3: } & \alpha_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in C
\end{aligned} \tag{13}$$

最优资源分配问题P3的表达如式(13)，其决定了每个 CU 与哪一个 DU 配对共享频谱，此用户配对最优化问题显然是一个二向图最优权值匹配问题，两边的顶点集合对应于 CU 集合与 DU 集合，两集合顶点之间的连线代表用户配对，连线形成边的权重是 $\Delta R_{i,j}^{C,u}$ 或 $\Delta R_{i,j}^{C,d}$ 的计算结果。因此，本方法使用经典的KM算法(Kuhn-Munkres)即可获得P3的最优解。

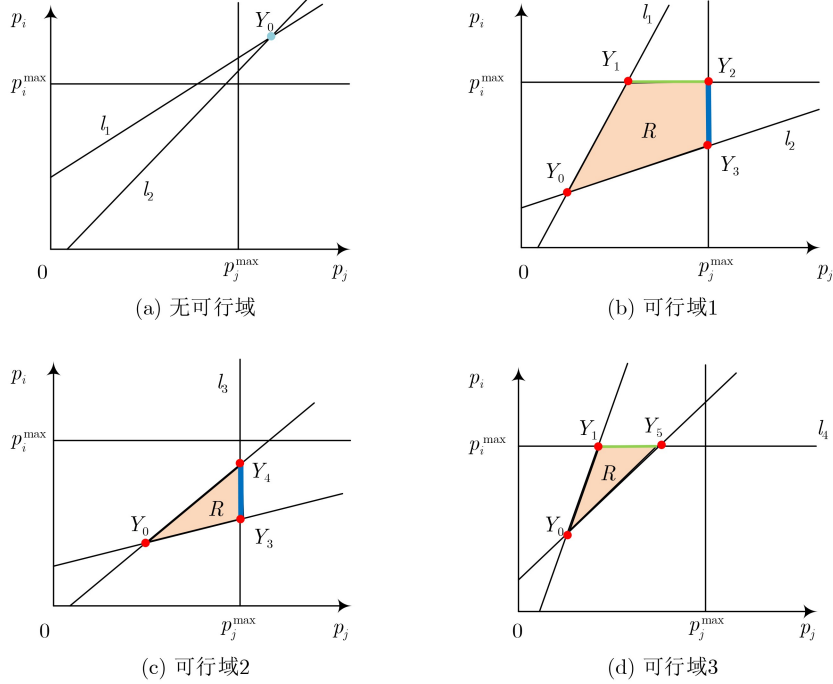


图 2 每一组DU-CU配对功率控制结果的可行域类型

4 最小蜂窝用户速率最大化设计

CU和速率最大化设计保证了CU用户整体的性能体验，但是对于个别CU而言可能仍然得不到较好的体验，尤其是对于那些信道条件比较差的用户。为解决这个问题，本文提出了一种资源分配的公平性算法，该算法通过最大化CU最小速率使得用户之间的性能体验更具有有一致性。

4.1 问题建模

为了最大化所有CU中的最小速率，该问题可以建模成如P4所示的优化问题，其约束条件与P1相同

$$\begin{aligned} \text{P4: } & \max_{\rho_{i,j}, p_i, p_j, p_{B,j}} \min_{j \in C} R_j \\ \text{s.t. (10): } & \text{C1} - \text{C7} \end{aligned} \quad (14)$$

P4同样是一个非凸混合整数非线性规划问题，本方法用解决P1的相同方式，将其解耦成功率控制与资源分配两个子问题。其中建立的功率控制优化问题的解法与CU和速率最大化设计中的P2相同，求出最优功率解最大化 $R_{i,j}^C$ ，而资源分配问题需要重新设计。

4.2 资源分配

P4解耦而来的资源分配问题可以建模成如P5所示的优化问题，由于只有与DU配对成功的CU涉及频谱资源共享问题，所以本方法需要最大化已配对CU中的最小速率。与P3不同的是，为了简单明了，P5的建模中不区分上、下行频谱共享场景。

$$\begin{aligned} \text{P5: } & \max_{\rho_{i,j}, p_i, p_j, p_{B,j}} \min_{j \in C} \sum_{i=1}^Q \rho_{i,j} R_{i,j}^C \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{j=1}^P \rho_{i,j} \leq 1, \quad \rho_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in C \\ \text{C2: } & \sum_{i=1}^Q \rho_{i,j} \leq 1, \quad \rho_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in D \end{aligned} \quad (15)$$

为了解决P5，本方法基于二分查找与KM算法设计了一个具有多项式时间复杂性的公平性算法，这参考了一些车联网中保持车端稳定性的方案^[15]。该算法首先将CU速率矩阵 $\{R_{i,j}^C\}_{Q \times P}$ 中的所有元素按大小排序为一个有QP个元素的向量，然后通过二分搜索找到配对后最大的最小CU速率的位置，算法主体的伪代码见算法1所示。解决P5中的资源分配问题，最大化配合对后的CU中的最小速率。

在公平性算法的第7步-第13步的二分查找设置中用到了一个重要的结论：对于 $v(l)$ 为任意值，对矩阵 $\{F_{i,j}\}_{Q \times P}$ 使用KM最小权值算法并返回最小权值 w 与对应的分配方案，都有以下结论：

- (1) 如果 $w = 0$ ，则表示在该分配方案下， $\{R_{i,j}^C\}_{Q \times P}$ 中没有任何元素小于 $v(l)$ 。
- (2) 如果 $w > 0$ ，表示没有任何分配方案能够保证 $\{R_{i,j}^C\}_{Q \times P}$ 中所有元素不小于 $v(l)$ 。

算法最后返回最大化的最小CU速率 $\max R_{i,j}^{C, \min}$ 以及最优配对方案 $\{\rho_{i,j}\}_{Q \times P}$ 。

算法1 公平性算法

- (1) 计算已配对CU的速率矩阵 $\{R_{i,j}^C\}_{Q \times P}$ 。
- (2) 对 $\{R_{i,j}^C\}_{Q \times P}$ 中元素降序排列成向量 \mathbf{v} , 并初始化索引 $m = 1, n = QP$ 。
- (3) **while** $(n - m) > 1$ **do**
- (4) $l = (n - m) / 2$;
- (5) 初始化一个矩阵 $\{F_{i,j}\}_{Q \times P}$, 并为其中元素赋值,
 $R_{i,j}^C < \mathbf{v}(l)$ 时对应位置赋1, 否则为0
- (6) 对 $\{F_{i,j}\}_{Q \times P}$ 使用KM最小权算法, 返回分配指示矩阵
 $\mathbf{E}_{Q \times P}$ 与对应的权重 w 。
- (7) **if** $w = 0$ **then**
- (8) $n = l$;
- (9) **else**
- (10) $m = l$;
- (11) $\{\rho_{i,j}\}_{Q \times P} = \mathbf{E}$;
- (12) **end if**
- (13) **end while**
- (14) 在 $\{R_{i,j}^C \cdot \rho_{i,j}\}_{Q \times P}$ 中搜索除0元素外最小的元素, 即为最大
CU最小速率 $R_{i,j}^{C,\min}$ 。
- (15) 返回 $\{\rho_{i,j}\}_{Q \times P}$ 与 $\max R_{i,j}^{C,\min}$ 。

5 仿真结果与分析

本节通过仿真提供了用于验证本文所设计的两种算法有效性的数值结果。系统建模如图2所示, FD-D2D可以选择与上行CU或下行CU共享频谱通信。仿真中的主要参数如下: 用户发射功率24 dBm, 基站发射功率46 dBm, CU个数为28, 并假设1/2做上行业务1/2做下行业务, D2D设备自干扰抑制能力为110 dB。在仿真中本文假设每个CU等分载波带宽与基站功率, 即子载波个数 K 与CU个数相同。

首先, 需要先验证系统模型在D2D中加入FD特性所带来的优越性。为此, 本文使用无D2D共享的小区以及蜂窝网络下HD-D2D组网两种模型作为对比, 并在HD-D2D组网中使用本文所设计的两种算法。数值仿真结果如图3所示, 与无D2D的蜂窝小区相比引入D2D共享频谱能明显提升小区和速率, 而FD-D2D组网对比传统的HD-D2D组网在使用MaxSumCU与MaxMinCU两种算法下都能进一步提升小区和速率, 在DU满载时分别提高了17%与23%。

为了验证MaxSumCU算法的有效性, 本文引入小区和速率最大化(MaxSumCell)算法作用于FD-D2D网络和无D2D的蜂窝网络作为参考。如图4所示, MaxSumCell算法虽然最大化了小区性能, 但是大大牺牲了CU的性能, 可以看到当DU满载时, CU性能折损了61%。而本文所提出的Max-

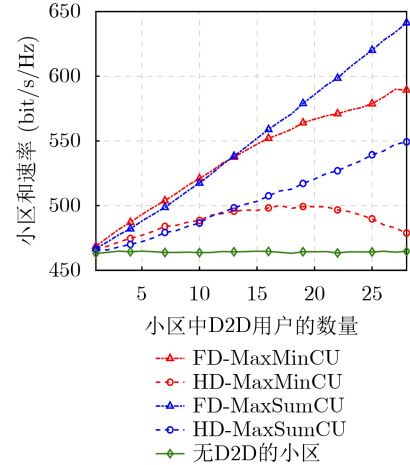


图3 蜂窝网络下FD-D2D与HD-D2D组网的小区速率性能对比

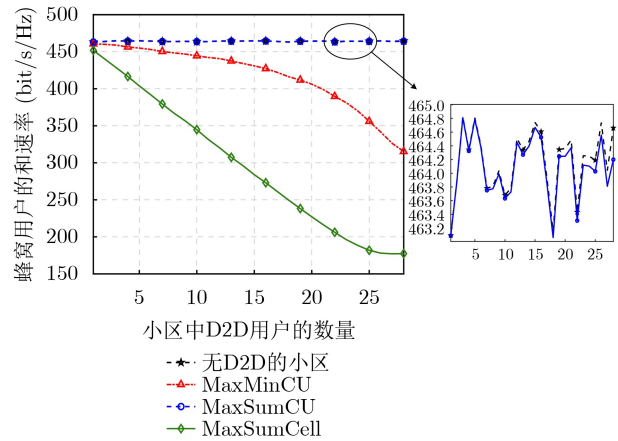


图4 蜂窝网络下FD-D2D组网中3种算法的CU和速率对比

SumCU算法最大程度上保护了CU整体的性能, 在小区和速率提升38%的情况下, 其性能曲线与无D2D的小区几乎重合, 说明其几乎不损失CU整体的和速率。

接下来验证MaxMinCU算法的有效性, 本文对比3种算法在FD-D2D组网中以最小CU速率为度量的性能。仿真结果见图5, 就最小CU速率而言, MaxMinCU算法的性能严格高于MaxSumCell与MaxSumCU两种算法, 说明了该算法的有效性。但是随着DU数量的增加, MaxMinCU算法的最小CU速率逐渐下降, 当DU满载时, MaxMinCU的最小CU速率仅比MaxSumCell的高13.6%。鉴于MaxMinCU算法的小区速率与CU和速率在DU接近满载时对比MaxSumCU的性能都损耗较多, 只换取的13.6%的最小CU速率增益并不合算, 因此本文建议在DU数量低于满载70%时再考虑使用MaxMinCU算法保护CU性能体验。

6 结论

本文为了保护蜂窝网络下同时同频FD-D2D组

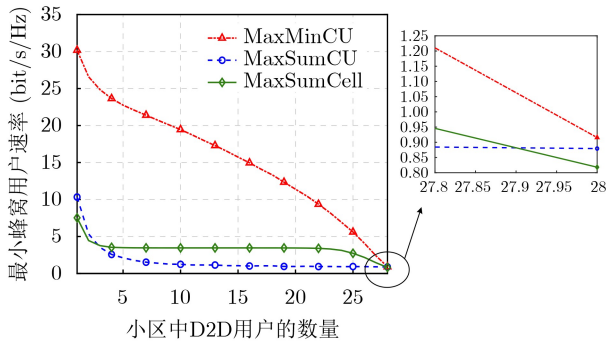


图 5 蜂窝网络下FD-D2D组网中3种算法的最小CU速率对比

网中蜂窝用户的性能体验，设计了两种干扰协调算法，MaxSumCU与MaxMinCU算法，同时引入MaxSumCell算法作为基准，并将FD-D2D组网与无D2D小区和HD-D2D组网两种系统做对比。通过仿真实验的数值结果，本文验证了所提出的两种算法的有效性，鉴于不同性能指标上的折中考虑，本文给出了部署两种CU保护算法的建议。

参考文献

- [1] ZHANG Hongliang, SONG Lingyang, and HAN Zhu. Radio resource allocation for device-to-device underlay communication using hypergraph theory[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4852–4861. doi: [10.1109/TWC.2016.2547862](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2547862).
- [2] NI Minming and PAN Jianping. Throughput analysis for downlink resource reusing D2D communications in cellular networks[C]. 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017: 1–7. doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8254846](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254846).
- [3] LEE N, LIN Xingqin, ANDREWS J G, *et al.* Power control for D2D underlaid cellular networks: Modeling, algorithms, and analysis[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(1): 1–13. doi: [10.1109/JSAC.2014.2369612](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2369612).
- [4] KAI Caihong, WU Yan, PENG Min, *et al.* Joint uplink and downlink resource allocation for NOMA-enabled D2D communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(6): 1247–1251. doi: [10.1109/LWC.2021.3063169](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3063169).
- [5] KAI Caihong, LI Hui, XU Lei, *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. doi: [10.1109/TVT.2019.2903815](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2903815).
- [6] 徐磊. 5G蜂窝网络中D2D通信的资源分配算法研究[D]. [硕士论文], 合肥工业大学, 2019.
XU Lei. Research on resource allocation algorithms for D2D communications in 5G cellular networks[D]. [Master dissertation], Hefei University of Technology, 2019.
- [7] SHI Chengzhe, PAN Wensheng, and SHAO Shihai. RF wideband self-interference cancellation for full duplex phased array communication systems[C]. 2022 IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, 2022: 1094–1099. doi: [10.1109/ICC45855.2022.9838572](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838572).
- [8] SHI Chengzhe, PAN Wensheng, SHEN Ying, *et al.* Robust transmit beamforming for self-interference cancellation in STAR phased array systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, 29: 2622–2626. doi: [10.1109/LSP.2022.3229641](https://doi.org/10.1109/LSP.2022.3229641).
- [9] YANG Tinghan, ZHANG Rongqing, CHENG Xiang, *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. doi: [10.1109/TVT.2017.2657791](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2657791).
- [10] HEMACHANDRA K T, RAJATHEVA N, and LATVA-AHO M. Sum-rate analysis for full-duplex underlay device-to-device networks[C]. 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Istanbul, Turkey, 2014: 514–519. doi: [10.1109/WCNC.2014.6952081](https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952081).
- [11] NGUYEN T H and NGUYEN T T. On performance of STAR-RIS-enabled multiple two-way full-duplex D2D communication systems[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 89063–89071. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3200834](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3200834).
- [12] YANG Yihuai, YANG Bin, SHEN Shikai, *et al.* Covert rate study for full-duplex D2D communications underlaid cellular networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(17): 15223–15237. doi: [10.1109/JIOT.2023.3265275](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3265275).
- [13] VU H V, TRAN N H, and LE-NGOC T. Full-duplex device-to-device cellular networks: Power control and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3952–3966. doi: [10.1109/TVT.2019.2898999](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2898999).
- [14] FENG Daquan, LU Lu, YI Yuanwu, *et al.* Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3541–3551. doi: [10.1109/TCOMM.2013.071013.120787](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.071013.120787).
- [15] LIANG Le, LI G Y, and XU Wei. Resource allocation for D2D-enabled vehicular communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7): 3186–3197. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2699194](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2699194).
- [16] 全欣, 刘颖, 范平志, 等. 一种抑制相位噪声的多通道变时延下变频全双工收发方法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(5): 1627–1634. doi: [10.11999/JEIT220464](https://doi.org/10.11999/JEIT220464).
QUAN Xin, LIU Ying, FAN Pingzhi, *et al.* A multiple-downconversion full-duplex transceiver receiver design for phase noise suppression[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(5): 1627–1634. doi: [10.11999/JEIT220464](https://doi.org/10.11999/JEIT220464).

周阅天：男，博士生，研究方向为全双工组网技术、通信抗干扰技术等。

邵士海：男，教授，博士生导师，研究方向为无线通信信号处理、抗干扰与安全通信等。

齐 飞：男，博士，高级工程师，研究方向为天地一体化网络、通信感知一体化技术等。

时成哲：男，博士生，研究方向为通信抗干扰技术、MIMO阵列天线技术等。

责任编辑：余 蓉