



引用格式:袁雨薇,侯嘉.基于距离和系统吞吐量最大化的D2D上行链路资源分配方案[J].科学技术与工程,2023,23(32):13881-13888.
Yuan Yuwei, Hou Jia. Uplink resource allocation scheme based on distances and maximized system throughput for D2D communications[J].
Science Technology and Engineering, 2023, 23(32): 13881-13888.

电子技术、通信技术

基于距离和系统吞吐量最大化的 D2D 上行 链路资源分配方案

袁雨薇¹, 侯嘉^{1,2*}

(1. 苏州大学电子信息学院, 苏州 215006; 2. 电子科技大学长三角研究院(衢州), 衢州 324000)

摘要 终端直连(device-to-device, D2D)通信的研究主要关注的是蜂窝用户(cellular user, CU)和D2D用户之间存在的干扰问题,而解决该问题的方法是进行合理的资源分配,但以往的研究大都仅考虑D2D用户之间的通信质量或仅考虑CU的可靠性,却忽视了系统总吞吐量和资源复用效率的优化。基于D2D用户、CU和基站(base station, BS)三者间的通信距离,提出了一种资源分配方案,该方案能结合资源复用函数矩阵进行预分组和资源选择,综合降低CU对D2D用户的干扰(cellular-to-D2D, C2D)和D2D用户对CU的干扰(D2D-to-cellular, D2C),同时保证CU和接入的D2D用户对都满足各自的通信服务质量(quality-of-service, QoS)要求。数值仿真结果表明:该方案与贪婪启发式算法相比,系统总吞吐量可以提升约4%,系统平均复用效率提高2倍以上。

关键词 终端直连(D2D)通信; 距离; 上行链路; 干扰缓解; 资源分配

中图分类号 TN929.5;

文献标志码 A

Uplink Resource Allocation Scheme Based on Distances and Maximized System Throughput for D2D Communications

YUAN Yu-wei¹, HOU Jia^{1,2*}

(1. School of Electronics & Information, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Yangze Delta Region Institute (Quzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Quzhou 324000, China)

[Abstract] The research on device-to-device (D2D) communication mainly focus on the interference between cellular user (CU) and D2D users. Resource allocation is the main method to solve the problem. However, most of the previous studies only considered the communication quality of D2D users or the reliability of CU and ignored the total system throughput and the resource reuse efficiency. A resource allocation scheme based on the distance between D2D users, CU and base station (BS) was proposed, which combined resource reuse function matrix for prepacking and resource selection. The interference of CU to D2D users (C2D) and the interference of D2D users to CU (D2C) were comprehensively reduced. At the same time, both CU and D2D users were guaranteed to meet their quality-of-service (QoS) requirements respectively. Compared with the greedy heuristic algorithm, numerical results show that the total throughput of the system is improved by about 4%, and the average multiplexing efficiency of the system is improved by more than 2 times in this scheme.

[Keywords] device-to-device(D2D) communication; distance; uplink; interference mitigation; resource allocation

随着蜂窝用户(cellular user, CU)数量急剧上升,使有限的频谱资源面临严峻的挑战。因此,减轻基站(base station, BS)的通信负荷与合理利用有限频谱资源显得尤为重要。终端直连(device-to-device, D2D)通信是一种使用授权频谱、允许设备间直接进行数据传输、可复用其他CU资源块的短距

离无线通信技术^[1-2],具有广泛应用场景,如作为应急通信方式保证正常通信^[3]、或作为中继提高小区边缘用户的通信性能。然而资源块的复用会导致主要CU和次要D2D用户之间的干扰:D2D用户对CU的干扰(D2D-to-cellular, D2C)和CU对D2D用户的干扰(cellular-to-D2D, C2D),所以必须在资源

收稿日期:2022-11-26; 修订日期:2023-08-09

基金项目:国家自然科学基金(62071319)

第一作者:袁雨薇(1998—),女,汉族,江苏扬州人,硕士研究生。研究方向:无线通信。E-mail:978004364@qq.com。

*通信作者:侯嘉(1977—),男,汉族,广东韶关人,博士,教授。研究方向:信息与通信系统。E-mail:houlia@suda.edu.cn。

共享期间对干扰进行缓解才可发挥 D2D 通信优势^[4]。有关干扰缓解技术的研究主要有两个方向,分别为功率控制^[5-7]和资源分配^[8-12]。而限制用户的发射功率虽可降低干扰,但也会影响用户自身的通信质量,故功率控制不是最佳的抗干扰方案。资源分配方法包括启发式算法^[8-11]、博弈论^[12-17]、图论^[18]和模糊聚类^[19]等。文献[10]提出了一种基于跨层资源分配的优化算法,在保证用户通信服务质量(quality-of-service, QoS)的条件下,最大化 D2D 用户的吞吐量。文献[14]建立非合作博弈模型,结合分层思想设计了功率控制与资源分配算法,在保证用户 QoS 的前提下提高了系统的吞吐量。图论的算法在 D2D 资源分配中主要用来为 D2D 用户对和 CU 进行资源匹配,可有效协调 CU 和 D2D 用户对,增加蜂窝系统容量,如文献[18]中在传输功率和中断概率的限制下,对优化问题构造二部图,利用匈牙利算法对资源匹配问题进行求解。

然而,以上方法都集中于减少 D2C 干扰,并依赖于 BS 需要知道所有相关链路的信道状态信息(channel state information, CSI),系统的复杂度和开销都较大。因此,基于距离的低开销资源分配方法近来受到关注。文献[20]提出了一种基于 CU 与 D2D 用户接收端之间距离的资源分配方案,在保证 CU 通信质量的前提下降低 C2D 干扰,从而最大化 D2D 用户之间的通信质量。然而,该研究仅讨论了单个 D2D 用户对和多个 D2D 用户对复用单个 CU 资源的情况,缺乏对多个 D2D 用户对复用多个 CU 资源时整个系统的资源分配和优化的分析研究。文献[21]做出改进,根据 CU 用户与 D2D 用户接收端的距离提出了二维距离矩阵,并在此基础上按照矩阵中较远距离的规则进行 CU 用户资源复用的预分组,每个 CU 用资源最多能被 3 组 D2D 用户对复用,实现了多用户资源复用。但该方案也仅以保证所有 D2D 用户的 QoS 作为资源分配的目标,而 CU 用户的通信质量需求的优先权没有被重视。

针对低开销的基于距离的资源优化分配问题,考虑多 D2D 用户对复用多个 CU 资源的场景,提出一种同时保证 CU 和 D2D 用户对 QoS 需求的前提下,综合降低 C2D 干扰和 D2C 干扰的优化算法。该算法利用 3 种距离参数:CU 到 BS 的距离、D2D 用户到 BS 的距离以及 CU 到 D2D 用户的距离,并依赖它们进行了资源复用预分组和最大化系统总吞吐量目标函数计算,再结合一个资源复用函数矩阵进行表达。与文献[21]相比,所提方案可同时满足 CU 和 D2D 用户对 QoS 需求,使系统总吞吐量得到提升且系统平均复用效率较高。

1 系统模型

本文系统模型如图 1 所示,其中小区包含 M 个蜂窝用户,为 $CU_i, i \in \{1, 2, \dots, M\}$; N 个 D2D 用户对,为 $D_j, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, D_j 的发送端表示为 D_T_j ,接收端表示为 D_R_j 。假设系统可用通信资源块总数与 CU 数目 M 相同,其单个资源块表示为 RB_i 。考虑实际通信以蜂窝用户为主,限定 $M > N$,且所有用户共享蜂窝系统上行链路资源。

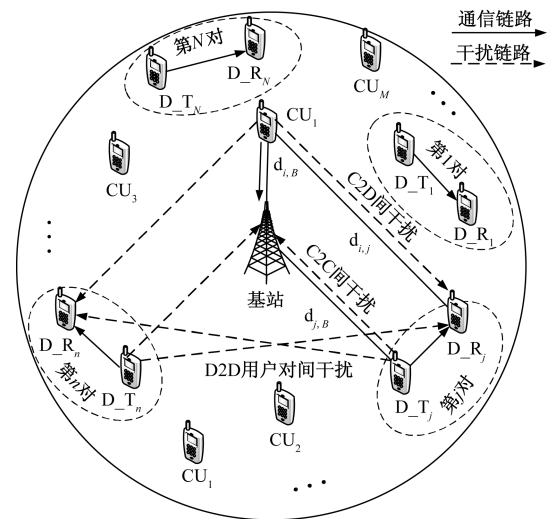


图 1 D2D 通信复用上行链路资源系统模型

Fig. 1 System mode for a D2D communication sharing uplink resources

所提信道模型除考虑文献[6]中的路径损耗模型外,还考虑了由多径传播导致的快衰落 ξ 以及阴影导致的慢衰落 β ,其中,快衰落 ξ 服从指数分布,慢衰落 β 服从对数正态分布。如蜂窝用户 CU_i 到 BS 的上行链路信道增益 $g_{i,B}$ 可表示为

$$g_{i,B} = \lambda \beta_{i,B} \xi_{i,B} d_{i,B}^{-\alpha} \quad (1)$$

式(1)中: $\beta_{i,B}$ 表示 CU_i 到 BS 之间路径的慢衰落, $\xi_{i,B}$ 为 CU_i 到 BS 之间路径的快衰落, λ, α 分别为路径损耗常数和路径损耗指数; $d_{i,B}$ 为 CU_i 到 BS 的距离。

类似式(1),对于第 j 个 D2D 用户对 D_j ,发送端 D_T_j 到接收端 D_R_j 之间的信道增益为 g_j ;蜂窝用户 CU_i 到 D2D 用户对接收端 D_R_j 之间的信道增益为 $g_{i,j}$,D2D 用户对发射端 D_T_j 到 BS 之间的信道增益为 $g_{j,B}$ 。

当 D2D 用户对 D_j 复用 CU_i 的资源块 RB_i 时, CU_i 在 BS 的接收信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)和 D_j 的 SINR 可分别表示为

$$\gamma_{CU_i} = \frac{P_{CU_i} g_{i,B}}{I_{CU_i} + \sigma_N^2} \quad (2)$$

$$\gamma_{D_j} = \frac{P_{D_j} g_j}{I_{D_j} + \sigma_N^2} \quad (3)$$

式中: p_{CU_i} 和 p_{D_j} 分别为 CU_i 和 D_j 发射端的发射功率; σ_N^2 为信道中加性高斯白噪声功率; I_{CU_i} 和 I_{D_j} 分别为在 BS 和 D_j 接收端的干扰,可表示为

$$I_{\text{CU}_i} = \sum_{j \in N} \rho_j^i g_{j,B} p_{D_j} \quad (4)$$

$$I_{D_j} = \sum_{n \in N, n \neq j} \rho_n^i g_{j,n} p_{D_n} + g_{i,j} p_{\text{CU}_i} \quad (5)$$

式中: $g_{j,n}$ 为当 D2D 用户对 D_j 和 D_n 复用同一资源块时,它们之间的信道增益; ρ_j^i 为 D2D 用户对 D_j 和 CU_i 间的信道复用指示函数,当 D2D 用户对 D_j 复用 CU_i 的信道资源时 $\rho_j^i = 1$, 否则 $\rho_j^i = 0$, 并用 $N \times M$ 的信号复用指示函数矩阵 \mathbf{P} 来表述系统中所有 D2D 用户与 CU 的资源复用情况。

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & \text{CU}_1 & \text{CU}_2 & \cdots & \text{CU}_i & \cdots & \text{CU}_M \\ \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_j \\ \vdots \\ D_N \end{matrix} & \begin{pmatrix} \rho_1^1 & \rho_1^2 & \cdots & \rho_1^i & \cdots & \rho_1^M \\ \rho_2^1 & \rho_2^2 & \cdots & \rho_2^i & \cdots & \rho_2^M \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_j^1 & \rho_j^2 & \cdots & \rho_j^i & \cdots & \rho_j^M \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_N^1 & \rho_N^2 & \cdots & \rho_N^i & \cdots & \rho_N^M \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式(6)中,矩阵的每行元素之和 $\sum_{i \in M} \rho_j^i \leq 1, \rho_j^i \in \{0,1\}$, 这意味着每对 D2D 用户只能复用一個信道资源块。为了增加频谱利用率,允许多对 D2D 用户复用同一资源块。但由于信道资源属于蜂窝用户,故 CU 比 D2D 用户具有更高的优先级。当 D2D 用户接入之后,不应対 CU 造成服务中断。为保证 CU 的 QoS,资源块存在被复用的限制次数 k , 即矩阵的每列元素之和 $\sum_{j \in N} \rho_j^i \leq k$ 。此外,为保证 D2D 用户对接入后 CU 和 D2D 用户的正常通信, CU 和 D2D 用户被设定了最小信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR) 阈值,记为 γ_{th} 。

本文系统模型主要存在 3 种距离: CU 到 BS 的距离、D2D 用户到 BS 的距离以及 CU 到 D2D 用户的距离,分别记作 $d_{i,B}$ 、 $d_{j,B}$ 和 $d_{i,j}$, 它们对于用户所受干扰的具体影响如表 1 所示。当其他 D2D 用户 D_n 也共享 CU_i 的资源块时, D_j 也会受到来自 D_n 发射端的干扰,设 $d_{j,n}$ 表示 D_j 和 D_n 之间的距离, $d_{j,n}$ 越大,表示 D_n 对 D_j 的干扰小,反之越大。

与传统方法仅考虑 D2D 用户间通信质量或仅考虑最大化 CU 通信质量的优化不同,设计一个最大化系统总吞吐量的优化目标函数,可表示为

表 1 3 种距离对于用户所受干扰的影响

Table 1 Influence of three distances on user interference

距离参数	影响对象	距离变化	影响效果
$d_{i,B}$	CU_i 自身的信道质量	$d_{i,B}$ 越小	抗干扰能力相对更强
$d_{j,B}$	CU_i 受到来自 D_j 干扰的大小	$d_{j,B}$ 越大	D_j 对 CU_i 的干扰越小
$d_{i,j}$	D_j 受到来自 CU_i 干扰的大小	$d_{i,j}$ 越大	CU_i 对 D_j 的干扰越小

$$\max_{\rho_j^i} \left\{ \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} [\log_2(1 + \gamma_{\text{CU}_i}) + \rho_j^i \log_2(1 + \gamma_{D_j})] \right\} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \gamma_{\text{CU}_i} \geq \gamma_{\text{th}}, \gamma_{D_j} \geq \gamma_{\text{th}}, \quad \forall i \in M, \forall j \in N, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in M} \rho_j^i \leq 1, \rho_j^i \in \{0,1\}, \quad (9)$$

基于该目标函数的资源分配能综合降低 D2C 干扰和 C2D 干扰,提高系统中 CU 和 D2D 用户的吞吐量总和。优化过程通过资源复用指示函数矩阵 \mathbf{P} 呈现,根据 ρ_j^i 的不同取值进行分配。

2 资源分配方案

所提的资源分配方案流程如图 2 所示,基于资源复用指示函数矩阵和参数的取值,资源分配方案可分为以下两步:

首先,进行一种基于距离的 D2D 接入控制与预分组方法。这里使用距离 $d_{j,B}$ 和距离 $d_{i,j}$ 进行矩阵变换,将矩阵 \mathbf{P} 中不可共享同一资源块的 CU 和 D2D 用户对所对应的资源复用指示函数 ρ_j^i 置零,再舍弃矩阵中列元素全为零的行和行元素全为零的列来实现矩阵降维。

然后,定义一个资源选择函数 W_j^i ,资源块的复用选择结果与距离 $d_{i,j}$ 有关。当考虑某种特殊情况,即 D2D 用户对到某几个 CU 的距离一样时,也需要考虑这几个 CU 与 BS 之间的距离 $d_{i,B}$, 优先选择通信质量好的 CU 进行复用。

2.1 D2D 用户接入控制和预分组

对于 D2D 用户控制和预分组的具体实现,需要在预分组前先将矩阵 \mathbf{P} 的列向量按照距离 $d_{i,B}$ 由小到大的规则进行调整顺序。

当 N 对 D2D 用户接入网络时,首先要确定哪些 D2D 用户对可以在满足其自身和 CU 的 QoS 条件下允许被接入网络。其次在确定了可接入的 D2D 用户对后,要对其进行分组,分别确定它们可与哪些 CU 进行资源共享。

当 D_j 复用用户 CU_i 的资源接入网络时,必须满足式(8)定义的用户最小 SINR,此时 $\rho_j^i = 1$ 。因此,

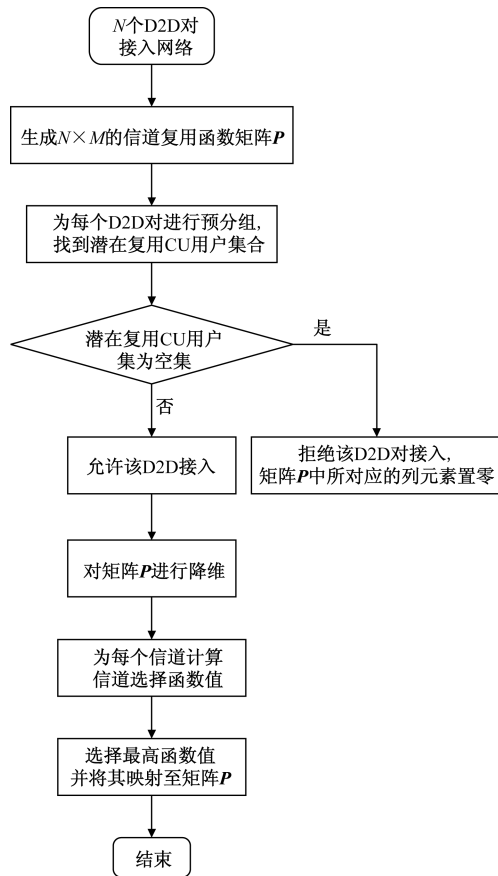


图2 所提的资源分配方案

Fig. 2 A proposed resource allocation method

D_j 可通过复用 CU_i 的资源接入网络的条件为

$$\begin{cases} \gamma_{CU_i} = \frac{P_{CU_i}g_{i,B}}{h_{j,B}p_{D_j} + \sigma_N^2} \geq \gamma_{th} \\ \gamma_{D_j} = \frac{P_{D_j}g_j}{h_{i,j}p_{CU_i} + \sigma_N^2} \geq \gamma_{th} \end{cases} \quad (10)$$

由此可以得到如下定理。

定理 1 当且仅当 $d_{j,B} \geq d_{j,B}^{i,\min}$ 时, D_j 才可复用用户 CU_i 的资源,其中

$$d_{j,B}^{i,\min} = \left(\frac{\gamma_{th}P_{D_j}\lambda\beta_{j,B}\xi_{j,B}}{P_{CU_i}g_{i,B} - \gamma_{th}\sigma_N^2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (11)$$

式(11)表示 D_j 和 BS 之间满足 CU_i 最小 SINR 要求的最短接入距离。

证明:

首先将式(10)进行化简,可得到 D2D 用户对 D_j 在 BS 处对 CU_i 产生的干扰增益需要符合式(12)要求。

$$h_{j,B} \leq \frac{P_{CU_i}g_{i,B} - \gamma_{th}\sigma_N^2}{\gamma_{th}P_{D_j}} \quad (12)$$

然后将式(1)代入式(12),可以得到当 D2D 用户对 D_j 要复用 CU_i 的信道资源时, D_j 和 BS 之间的距离需要符合以下的要求。

$$d_{j,B} \geq \left(\frac{\gamma_{th}P_{D_j}\lambda\beta_{j,B}\xi_{j,B}}{P_{CU_i}g_{i,B} - \gamma_{th}\sigma_N^2} \right)^{1/\alpha} \quad (13)$$

同理,也可以根据式(10)得到当 D2D 用户对 D_j 选择所要复用 CU_i 资源时所要考虑满足的条件。已知 $d_{i,j}$ 表示 CU_i 到 D_j 的距离,可以得到如下定理。

定理 2 当前仅当 $d_{i,j} \geq d_{i,j}^{\min}$ 时, D_j 才会选择该 CU_i 的信道资源进行复用,其中

$$d_{i,j}^{\min} = \left(\frac{P_{CU_i}\gamma_{th}\lambda\beta_{i,j}\xi_{i,j}}{P_{D_j}g_j - \sigma_N^2\gamma_{th}} \right)^{-\alpha} \quad (14)$$

式(14)表示 D_j 和 CU_i 之间满足 D_j 最小 SINR 要求的最短接入距离。

证明:

首先,通过将式(10)进行化简,可得到 CU_i 对 D2D 用户对 D_j 接收端产生的干扰增益需要符合式(15)要求。

$$h_{i,j} \leq \frac{P_{D_j}g_j - \sigma_N^2\gamma_{th}}{P_{CU_i}\gamma_{th}} \quad (15)$$

然后,将式(1)代入式(15),可以得到当 D2D 用户对 D_j 选择所要复用的 CU_i 信道资源时, D_j 和 CU_i 之间的距离需要符合式(16)要求。

$$d_{i,j} \geq \left(\frac{P_{CU_i}\gamma_{th}\lambda\beta_{i,j}\xi_{i,j}}{P_{D_j}g_j - \sigma_N^2\gamma_{th}} \right)^{-\alpha} \quad (16)$$

由此,定理 1 和定理 2 得证。根据定理 2,可得到以下推论。

推论 当 $d_{i,B}$ 越大时, $d_{j,B}^{i,\min}$ 越大,其中 $d_{j,B}^{i,\min}$ 表示 CU_i 和 BS 之间的距离。

基于以上定理和推论,BS 可以很直观的根据 D2D 用户对发射端和 BS 之间的距离以及 CU 与 D2D 用户对接收端之间的距离,判断其是否为可接入的 D2D 用户,然后为每个可接入的 D2D 用户找到所有潜在 CU 复用搭档,并放入潜在复用搭档的集合 R_j 中,具体分组方法如图 3 所示。

首先 CU 按照距离 BS 由近到远的顺序,即按照 $d_{i,B}$ 由小到大的顺序重新排列。根据定理 1,为每个 CU_i 依次计算 $d_{j,B}^{i,\min}$,对于每个要尝试接入网络的 D2D 用户对,判断当 D_j 要复用 CU_i 的信道资源时, D_j 与 BS 之间的距离是否满足 CU_i 的最短接入距离 $d_{j,B}^{i,\min}$ 。若满足,则根据定理 2 计算 $d_{i,j}^{\min}$,进一步判断 D_j 和 CU_i 之间的距离是否满足最短接入距离 $d_{i,j}^{\min}$,若满足则将 CU_i 放入潜在复用搭档集合 R_j 并进行下一个 CU 的判断。若不满足,根据推论可知,排在 CU_i 后面的 CU 都不满足,则结束判断。最后判断 D_j 的集合 R_j 是否为空集,若空集则表示该 D_j 不接入网络。

在矩阵 P 中,根据预分组的结果,将不可接入

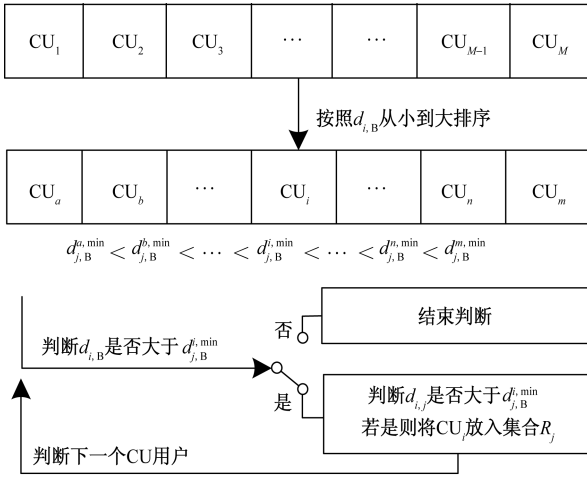


图3 所提的 D2D 用户预分组方法

Fig. 3 A proposed D2D user grouping method

的 D2D 对所对应行向量的列元素全部置零。此外,对于可接入的 D2D 用户对 D_j ,若用户 CU_i 不在其潜在复用集合 R_j 中,则将对应的信道复用指数函数 ρ_j^i 置为零并进行降维。假设经过预分组后,矩阵 \mathbf{P} 根据预分组的结果为式(17)所示的形式。

$$\mathbf{P} = \begin{matrix} & CU_1 & CU_2 & \dots & CU_i & \dots & CU_M \\ \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_k \\ \vdots \\ D_N \end{matrix} & \begin{pmatrix} \rho_1^1 & \rho_1^2 & \dots & \rho_1^i & \dots & 0 \\ \rho_2^1 & \rho_2^2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_N^1 & 0 & \dots & \rho_N^i & \dots & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

通过降维,资源复用指数函数矩阵可变换为大小 $R \times P$ 的矩阵 \mathbf{P}' ,可表示为

$$\mathbf{P}' = \begin{matrix} & CU_1 & CU_2 & \dots & CU_i & \dots & CU_P \\ \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_N \end{matrix} & \begin{pmatrix} \rho_1^1 & 0 & \dots & \rho_1^i & \dots & \rho_1^P \\ \rho_2^1 & \rho_2^2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \rho_N^1 & 0 & \dots & \rho_N^i & \dots & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

矩阵 \mathbf{P}' 的秩表示为 $r(\mathbf{P}')$,其中 $r(\mathbf{P}') = \min(R, P)$,秩 $r(\mathbf{P}')$ 的值也等于最大分组数。分组数与最大复用次数 k 密切相关,并呈反比关系。当 k 越大时,分组数则越小,当 k 越小时,分组数则越大,最大不超过最大分组数即 $r(\mathbf{P}')$ 。

2.2 基于资源选择函数的优化

2.1 节已通过基于距离的预分组方法,为每个可

接入的 D2D 用户对找到潜在复用集 R_j ,下面就是让可接入的 D2D 用户对 D_j 在 R_j 中进行资源选择。

资源选择考虑到以下方面:首先是优先选择信道带宽大的,其次是距离变量 $d_{i,j}$,它影响 C2D 干扰。除此之外,由于共同选择同一资源块的 D2D 用户对之间也会产生干扰,因此资源选择函数中还引入变量 n 来表示资源块被复用的次数,每当 CU_i 的资源块被复用后, n 就进行自增。它们以比值的形式在资源选择函数中进行表示。比值越大,对 D2D 用户对干扰越小。

基于以上的分析与考虑,提出一种资源选择函数的计算公式,用于为每个可接入的 D2D 用户对 D_j 在潜在集合 R_j 中选择最优的 CU 资源进行复用。首先为 R_j 中的每个 CU 计算资源选择函数值 W_j^i ,然后在集合 R_j 中选择函数值最大的 CU 复用。

$$\forall i \in R_j: W_j^i = \text{BW}_{\text{ch}} \frac{d_{i,j}}{n} \quad (19)$$

$$i^* = \underset{i \in R_j}{\text{argmax}} W_j^i \quad (20)$$

式中: BW_{ch} 为信道带宽; n 为共同复用 CU_i 信道资源的 D2D 用户对的数量; i^* 为所选的 CU_{i^*} ; 资源选择函数值 W_j^i 的大小代表当 D2D 用户对 D_j 尝试选择 CU_i 的资源进行复用时, CU_i 和其他 D2D 用户对 D_j 产生干扰情况的综合评估,函数值 W_j^i 越大,代表 D_j 选用该 CU_i 的信道资源时,受到的干扰相对越少。

在根据资源选择函数进行优化后,使选择的结果映射到矩阵 \mathbf{P}' 中。若 D_j 与 CU_i 的信道选择函数值 W_j^i 最大,则将矩阵 \mathbf{P}' 中所对应的 ρ_j^i 置为 1。

至此,将上面进行详细叙述的两个部分结合起来,就是本文所提的资源分配方案,第二步是在前一步的基础上求解。具体过程如表 2 所示。

3 仿真结果与分析

在仿真中,考虑单个孤立的圆形小区环境, M 个 CU 和 N 对 D2D 用户随机部署在以 BS 为原点、半径为 R 的小区中,且它们均分网络的上行带宽 W 。由于 D2D 用户对通信距离通常较短并且会动态变化,因此同文献[9],考虑一对 D2D 用户中的发射端和接收端均匀分布在半径为 r 的簇中且簇心在小区内随机分布。具体仿真参数如表 3 所示。

为了评估所提资源分配方法的性能,首先测量以下两个指标:系统总吞吐量和 CU 用户 SINR 的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。它们分别是指系统内 CU 和接入的 D2D 用户对吞吐量之和以及 CU 在资源共享后 SINR 的累积分布函数,以此来验证所要实现的性能优化目标。为进

一步分析所提算法的性能,提出一个新的指标,即资源平均复用效率,指 D2D 用户对接入网络后, D2D 用户对总吞吐量与 CU 资源共享前后所减少吞吐量的比值。例如,当 D2D 用户对总吞吐量相同时,

表 2 所提的基于距离的资源分配算法

Table 2 A proposed resource allocation method

初始化: $R_j = \emptyset$; 最大复用次数 k ; 资源块复用次数 $n_i = 0$	
1:	Step 1: D2D 用户接入控制和预分组
2:	for all $j \in N$ and $i \in M$ do
3:	calculate $d_{j,B}^{i,\min}$, $d_{i,j}^{i,\min} \leftarrow$ 定理 1, 定理 2
4:	if $d_{j,B} \geq d_{j,B}^{i,\min}$ then
5:	if $d_{i,j} \geq d_{i,j}^{i,\min}$ then
6:	$i \in R_j$
7:	end if
8:	end if
9:	end for
10:	for all $j \in N$ and $i \in R_j$ do
11:	if $R_j = \emptyset$ then
12:	$N = N - j$
13:	end if
14:	end for
15:	Step 2: 基于资源选择函数
16:	for all $j \in N$ and $i \in R_j$ do
17:	$i^* = \operatorname{argmax}_{i \in R_j} W_j^i$
18:	if ($n_{i^*} \leq k$)
19:	set $\rho_j^{i^*} = 1$;
20:	else
21:	$R_j = R_j - \{i^*\}$;
22:	执行步骤 15;
23:	end for

注: n_{i^*} 为所选用户 CU_{i^*} 的复用次数; $\rho_j^{i^*}$ 为 D_j 和 CU_{i^*} 之间的信道复用指示函数。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	数值
小区半径 R/m	500
D2D 簇半径 r/m	100
蜂窝用户发射功率/dBm	21
D2D 发射端发射功率/dBm	21
CU 用户数量 M	20
D2D 用户对数 N	2, 4, 6, ..., 18
资源块数目 K	20
路径损耗常数 λ	10^{-2}
路径损耗指数 α	4
多径衰落	均值为 1 的指数分布
阴影衰落	标准差为 8 dB 的对数正态分布
信道带宽/MHz	1
噪声功率/dBm	-114
用户 SINR 阈值/dB	2, 5
资源块复用次数限制 k	1, 2, 3
仿真次数	100 000

CU 牺牲的吞吐量越少,资源复用效率越高。

将本文算法与 Heuristic 算法^[21]进行对比, Heuristic 算法是一种基于距离的资源分配算法,基本思路是让 D2D 用户对在系统内选择距离它最远的 CU 资源进行复用,此算法以最大化 D2D 用户吞吐量为目标。此算法简单但未考虑 CU 自身的信道质量以及共同复用同一资源块的 D2D 用户对之间的干扰影响,会使 CU 的 QoS 无法得到保证且造成较大的设计误差。

3.1 本文系统总吞吐量的性能验证分析

本文优化目标是同时满足 CU 和 D2D 用户的 QoS 条件下,综合提升 CU 和 D2D 用户的吞吐量,从而最大化系统吞吐量。而以往的研究中,主要考虑以下两种优化目标:①满足 CU 的 QoS 条件下,最大化 D2D 用户的吞吐量;②满足 D2D 用户的 QoS 条件下,最大化 CU 的吞吐量。实际上,本文优化目标下系统的总吞吐量应能包括以上两种目标下系统总吞吐量的最大值。故将这 3 种优化目标下的系统总吞吐量进行了对比分析,如图 4 所示,其中 SINR_{th} 表示用户被设定的最小 SINR 阈值。结果表明,在本文优化目标下,所提方案系统总吞吐量高于其他两种。

图 4 展示 SINR 阈值的变化对系统吞吐量产生的影响。从图 4 中可以看出,当 SINR 阈值较小时,系统总吞吐量反而较大。这是因为 SINR 阈值降低后,可接入的 D2D 用户对更多,虽然 CU 的总吞吐量会有所下降,但由于 D2D 用户之间通信质量较好, D2D 用户对增加的吞吐量远超过 CU 降低的吞吐量,使得系统吞吐量也显著提高。

图 5 比较了所提算法和 Heuristic 算法中系统总吞吐量的大小并分析了资源复用次数 k 对系统吞吐量的影响。在所提算法中,当 k 增大时,系统吞吐量也随之增大。这是因为当资源块可被复用的次数增

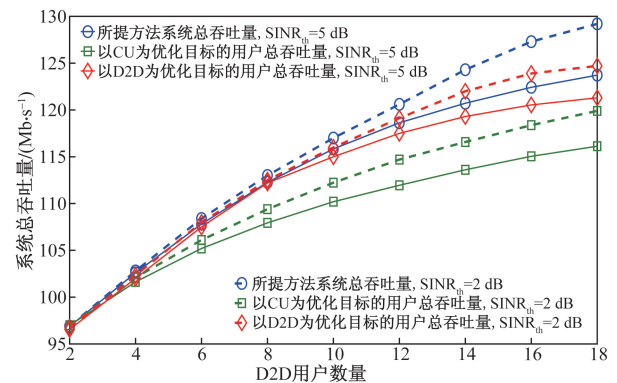


图 4 3 种优化目标下系统总吞吐量的性能分析

Fig. 4 Performance analysis of total system throughput under three optimization objectives

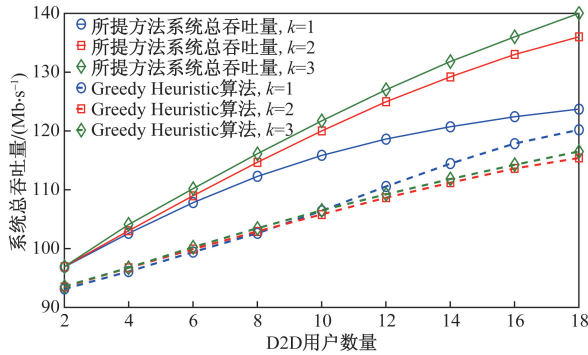


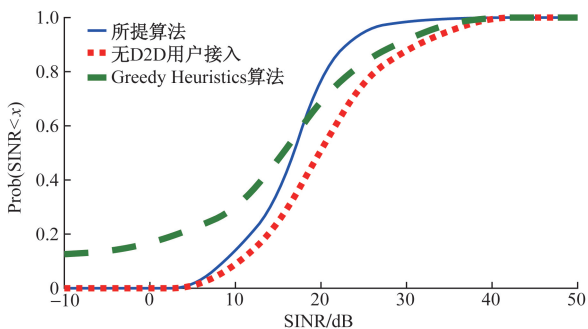
图5 资源块复用次数对系统吞吐量的影响

Fig. 5 Influence of resource block reuse times on system throughput

大时,接入的 D2D 用户也变多。而在 Heuristic 算法中,随着 D2D 用户对的增加,当 $k=2$ 或 3 时的系统总吞吐量反而比 $k=1$ 时更小,这是因为 Heuristic 算法未考虑共享同一资源时 D2D 用户对之间的干扰。当 D2D 用户越来越多,它们之间产生的干扰也随之变大,导致 D2D 用户对吞吐量显著减少。当复用次数相同时,所提算法的系统总吞吐量平均高于 Heuristic 算法约 4%。

3.2 两种算法 CU 用户 SINR-CDF 性能分析

比较两种算法下 CU 在资源共享后关于 SINR 的累计分布函数,结果如图 6 所示,假设系统中 CU 的 SINR 阈值为 5 dB,Heuristic 算法中约有 30% 的 CU 无法满足其 QoS 要求,而所提算法中所有 CU 均可满足,达到本文优化目标。



x 为各 SINR; Prob 为系统中实际 SINR 小于 x (某个设定 SINR 值) 的概率

图6 CU 用户 SINR-CDF 性能分析

Fig. 6 Performance analysis of SINR-CDF on CU users

3.3 两种算法系统平均复用效率性能分析

从图 7 可以看出,所提算法的系统复用效率远高于 Heuristic 算法。这是因为本文算法在提升 D2D 用户吞吐量的同时也控制了 CU 吞吐量的牺牲。在同样的条件下,本文算法的复用效率可提高 2 倍以上。

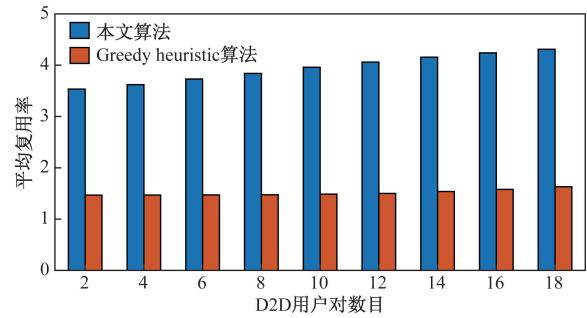


图7 系统平均复用效率性能分析

Fig. 7 Performance analysis of system average reuse efficiency

4 结论

针对蜂窝网络下的 D2D 通信,提出了一种基于 CU 和 D2D 用户对以及 BS 之间距离的资源分配方案,以最大化系统总吞吐量,同时保证 CU 和 D2D 用户对用户的 QoS 要求。该方案用于 D2D 用户数目 N 小于蜂窝用户数 M 的情况下,数值仿真结果表明,该方案与贪婪启发式算法相比,系统总吞吐量可以提升约 4%,系统平均复用效率提高 2 倍以上。

参考文献

- [1] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49.
- [2] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 170-177.
- [3] 卫海超, 张家红, 刘铭岳, 等. 无人机联合 D2D 应急通信网络的性能分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6156-6163. Wei Haichao, Zhang Jiahong, Liu Mingyue, et al. Performance analysis of UAV joint D2D emergency communication network [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15): 6156-6163.
- [4] Safdar G A, Ur-Rehman M, Muhammad M, et al. Interference mitigation in device-to-device communications [M]. New York: Wiley, 2022.
- [5] Jänis P, Yu C H, Doppler K, et al. Device-to-device communication under-laying cellular communications systems [J]. Network and System Sciences, 2009, 2(3): 169.
- [6] 桑健, 周婷, 金彦亮. 基于 QoS 保障的蜂窝-D2D 系统功率控制算法 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(6): 109-111. Sang Jian, Zhou Ting, Jin Yanliang. D2D system based on QoS guarantee power control algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(6): 109-111.
- [7] 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]// 2019 Computing, Communications and IoT Applications. New York: IEEE, 2019: 17-22.
- [8] Boamah S, Ventura N. Interference minimization for uplink channel reusing in device-to-device communication underlying cellular networks [C]// 2019 IEEE AFRICON. New York: IEEE, 2019: 1-4.
- [9] Wahb S, Mostafa Y, Wasif O, et al. A Heuristic approach for opti-

- mizing resource allocation in D2D underlying cellular networks [C]//2021 17th International Computer Engineering Conference (ICENCO). New York: IEEE, 2021: 40-45.
- [10] Feng D Q, Lu L, Yi Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [11] Pesantez I, Vicuña V, Inga J, et al. A Heuristic algorithm for resource allocation in D2D communications under cellular networks [C]//2022 IEEE 6th Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Paris: IEEE, 2022: 1-6.
- [12] Huang J, Xing C C, Qian Y, et al. Resource allocation for multi-cell device-to-device communications underlying 5G networks: a game-theoretic mechanism with incomplete information[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2557-2570.
- [13] Xia C, Xu S, Kwak K S. Resource allocation for device-to-device communication in LTE-A network: a Stackelberg game approach [C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Beijing: IEEE, 2014: 1-5.
- [14] Noor M V M, Sreenivasan P M, Ravishankar T, et al. Energy-efficient resource allocation for device-to-device communication through noncooperative game theory[J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 33(6): 4279.
- [15] Wang X, Qian Z, Cong Y, et al. Joint channel and power allocation based on Stackelberg for D2D communications in cellular networks[C]//2020 IEEE Globecom Workshops. New York: IEEE, 2020: 1-6.
- [16] Wang D, Zhang S, Cheng Q, et al. Joint interference alignment and power allocation based on stackelberg game in device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 81651-81659.
- [17] Wang X, Pan H, Shi Y. Distributed resource allocation for D2D communications underlying cellular network based on Stackelberg game[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2022, 1: 1-18.
- [18] Hoang T D, Le L B, Le-Ngoc T. Resource allocation for D2D communication underlaid cellular networks using graph-based approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 7099-7113.
- [19] 薛建彬, 郭玉晶. 异构网络中 D2D 资源分配算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 128-131.
- Xue Jianbin, Guo Yujing. D2D resource allocation algorithm in heterogeneous networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2): 128-131.
- [20] Duong Q, Hin Y S, Shin O S. Distance-based resource allocation scheme for device-to-device communications underlying cellular networks[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(10): 1437-1444.
- [21] Rajkumar N, Lakshmanan M, Mohammed V N, et al. Distance based uplink resource sharing for device-to-device communication [C]//4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS). New York: IEEE, 2017: 74-77.