

基于最大权匹配的 D2D 资源分配算法研究

汤 灿,张一璠,沈君凤*

(湖北大学人工智能学院,湖北 武汉 430062)

摘要: D2D 通信具备更加低的时延,同时拥有高传输率与低功耗的优势,文章研究 D2D 通信算法,通过建立系统模型,提出目标函数,利用实验仿真证明所提算法的性能,重点对单小区下 D2D 通信技术中的资源分配展开研究,提出了一种以最大化系统吞吐量的算法,在满足 CU 和 DU 最低 SINR 的前提下,为 D2D 用户提供了更多的频谱资源选择,还可以提升频谱资源的利用率。

关键词: D2D 通信; 系统模型; 资源分配

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 2096-9759(2023)06-0066-03

Research on D2D resource allocation algorithm based on maximum weight matching

TANG Can, ZHANG Yifan, SHEN Junfeng

(School of Artificial Intelligence of Hubei University, Wuhan 430000, China)

Abstract: The Institute of Artificial Intelligence D2D communication has the advantages of lower delay, high transmission rate and low power consumption. This paper studies the D2D communication algorithm, establishes the system model, proposes the objective function, and uses the experimental simulation to prove the performance of the proposed algorithm. It focuses on the resource allocation in the D2D communication technology in a single cell, and proposes an algorithm to maximize the system throughput. On the premise of meeting the minimum SINR of CU and DU, It provides D2D users with more choices of spectrum resources and can also improve the utilization of spectrum resources.

Key words: D2D communication; system model; resource allocation

1 引言

为了满足移动设备的快速增长和两个相邻用户之间本地业务负载需求的增加, D2D 通信被认定为一种极具应用前景的技术,它允许近距离的无线用户不通过基站直接交换信息。这种模式一方面减轻了网络回程的沉重负担,提高了终端用户体验、频谱效率和网络覆盖率方面的性能,另一方面也提供了高数据速率的短程传输。然而, D2D 通信面临许多问题,如干扰管理、设备发现、安全问题和模式选择。

在中远距离通信方案中,由于设备的发射功率有限,用户信号需要经过基站 BS (Base Station) 滤波接收后对信号放大转发,其不但传输效率低下,也会增加传输时延,必然限制了用户获得更好的体验感。反观 D2D 技术,设备之间只需单跳即可实现数据传输,通信链路减少了基站这一跳,有效解决了多跳带来的低传输率以及高时延问题。不仅如此,作为 5G 的关键技术候选, D2D 与传统蜂窝网络共存,还具备降低设备端能耗的优势。然而, D2D 通信引入蜂窝网络中会导致同频干扰,而干扰增大则会引起蜂窝网络中的用户 QoS 降低,甚至可能出现蜂窝用户通信中断的情况。如何对频谱资源采取合理的分配、D2D 设备进行功率控制,这一伴随移动通信业务迅猛发展而来的技术问题已经成为制约移动通信领域业务发展的重要因素。

作为 5G 的一项关键技术, D2D 通信技术能够提高系统吞吐量、降低基站负载,具有提高系统性能的潜力,因此在研究 D2D 通信技术理论的同时,也在考虑逐步地将小部分成熟的 D2D 通信技术投入到实际应用中。

目前在 D2D 资源分配算法的研究主要有:

参考文献[1]主要考虑 D2D 用户在单小区中复用蜂窝用户上行链路信道的应用场景,重点研究了一对一和多对一两种资源分配方式,并提出了两种 D2D 资源分配算法。

参考文献[2]引入粒子群算法对已经处于稳定通信信道内的 D2D 用户通过进行合理的功率分配,并将粒子群算法进行改进,从而甄选出 D2D 用户的最优发射功率。

参考文献[3]针对多对 D2D 用户复用蜂窝网络资源的资源分配问题,以 D2D 用户簇对蜂窝链路的总干扰和作为优化目标。

2 基于最大权匹配的 D2D 资源分配算法的系统模型

目前普遍使用的短距离通信技术 Wi-Fi、蓝牙技术等虽然已经解决百米内通信问题,然而它们工作在非授权频段,传输过程欠缺安全性,服务质量也无法保障,另外它们在使用前必须进行设备匹配。相较于上述两种技术, D2D 通信不需要复杂的匹配过程,且工作在授权频段,传输数据时不仅更加安全,还具备更高的传输速率。将 D2D 通信与中继技术结合, D2D 通信可以将其他终端作为中继实现较远距离通信,且拥有良好的通信质量。

作为 D2D 通信中研究和应用最多的模式,该模式下基站会将一段频谱资源同时分配给 CU 和 DU,两者之间存在互相干扰,因此需要采用资源分配、联合功率控制等手段尽可能降低干扰对用户的影响,保证用户 QoS 的同时,提升系统吞吐量。蜂窝用户的通信链路包含上行链路 UL (Up-Link) 和下行链路 DL,而 D2D 用户只需要其中一种资源,考虑到一般基站发射功率远高于普通用户,一般离基站较近的复用 UL,而距离较远的复用 DL。除此之外,在 Underlay 模式下,根据资源

收稿日期:2023-03-02

基金项目:湖北大学大学生创新创业训练项目(No. X202110512067)。

作者简介:汤灿(1998-),男,湖北黄石人,研究生,硕士,主要研究方向:通信网络。

共享的用户密度不同,又存在 DU 与 CU 一对一、多对一、多对多的资源复用情况,能实现更高的频率利用率。

未来,将有大量用户通过蜂窝用户设备(CUE)接入云端进行各种数据业务,为了满足用户的需求,可以为用户提供高质量的服务(QoS),5G 和物联网(IoE)将成为下一代技术。设备到设备(D2D)通信是 5G 和 IoE 的通信的重要切入点。在 D2D 通信中,邻近设备共享信息,对 eNB 的依赖性较小。D2D 通信通过减少 eNB 上的负载,具有蜂窝通信不可企及的许多优势,例如 D2D 通信不仅降低了网络中的传输延迟、减少了拥塞,还提高了通信系统的频谱效率和能量效率。当前 D2D 通信的主要挑战是设备发现、资源分配、干扰管理和通信安全。在以设备为中心的网络中,关键的挑战是在超密集环境中容纳随机分布的 D2D 用户。当大量用户试图利用同一资源块时,产生同频干扰和跨层干扰的可能性很高。

考虑频谱资源终究是有限的,为了更加有效地复用分配给蜂窝用户的资源块,让系统能够处于低负载和过负载之间的较为理想的负载状态下,本文以提高通信系统整体的系统容量为目的,提出了一种基于最大权匹配的 D2D 资源分配算法。

D2D 用户对共享上下行链路的干扰分析系统模型如图 1 所示。

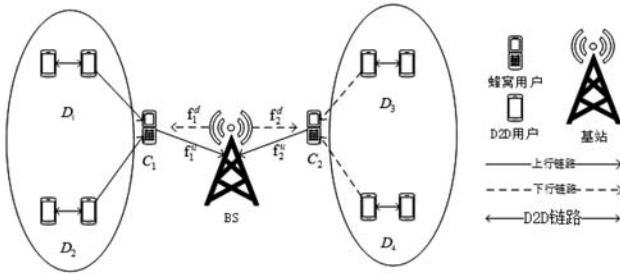


图 1 D2D 用户对共享上下行链路的干扰分析

本文考虑单一小区的集中式控制系统,其网络中的所有信道状态信息均由基站发送给用户,并假定 BS 已为 CU 分配信道资源,且 DU 数多于 CU 数。图 1 中包含一个位于小区中心的基站,以及 M 个蜂窝用户和 N 个 D2D 用户对。具体而言,蜂窝用户向基站发送信息采用 UL 资源,而当蜂窝用户需要从基站获取信息时则采用 DL 资源。因此, D2D 用户可以选择共享上行链路或是下行链路。本文采用多个 DU 复用同一个 CU 资源的复用方式,即多对一,但是该方式下同频干扰严重,需要采用合理的资源分配方案解决随之而来的干扰问题。

3 基于最大权匹配的 D2D 资源分配算法的目标函数

根据香农公式,结合 DU 及 CU 的最低 SINR 要求,本文将最大化系统吞吐量的目标函数列出。具体表示如下:

$$\max C_{D2D} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [x_{ji}^u \log_2(1 + \gamma_{ji}^u) + x_{ji}^d \log_2(1 + \gamma_{ji}^d)] \quad (1)$$

$$s.t. \quad \gamma_{ji}^u \geq \gamma_{th}^u; \quad \gamma_{ji}^d \geq \gamma_{th}^d \quad (2)$$

$$0 \leq P_{Dj}^u \leq P_{DMax}; \quad 0 \leq P_{Dj}^d \leq P_{DMax} \quad (3)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^M x_{ji}^u \leq 1; \quad 0 \leq \sum_{i=1}^M x_{ji}^d \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ji}^u x_{ji}^d = 0 \quad (5)$$

$$P_{Dj}^u = 0, \forall x_{ji}^u = 0; \quad P_{Dj}^d = 0, \forall x_{ji}^d = 0 \quad (6)$$

公式(1)是目标函数,表示最大化系统吞吐量,公式(2)~(6)均为需要满足的条件。各公式具体作用如下,式(2)中 γ_{th}^u 、 γ_{th}^d

表示蜂窝用户上行链路信噪比开启阈值、蜂窝用户下行链路信噪比开启阈值,此式用以保证蜂窝用户通信。式(3)中 P_{DMax} 表示 DU 设备能够达到的最大发射功率。式(4)表示 DU 最多复用同一个 CU 的信道资源。式(5)表示一个 D2D 用户只能复用 f_i^u 或者 f_i^d ,不能同时复用 f_i^u 和 f_i^d 。式(6)表示当 D2D 用户没有复用上行链路时, $P_{Dj}^u = 0$, 否则 P_{Dj}^u 不为零。由公式(1)~(6)易知,该目标函数为 NP 问题,只有遍历所有信道分配方案才能得出最优解。

本文定义一个因子:系统吞吐量增益 G 。然后通过 G 来确定 DU 的复用方式,即 DU 复用 b_i^u 或是 b_i^d 。

$$G = W_D + W_C' - W_C \quad (7)$$

式(7)中 G 表示 DU 复用 CU 资源后的系统吞吐量增益。其中 W_D 表示 DU 复用 CU 资源后系统 D2D 吞吐量, W_C' 表示 DU 复用 CU 资源后系统 CU 吞吐量, W_C 表示 DU 没有复用 CU 时系统 CU 吞吐量。

根据式(7),容易得出 D2D 用户簇复用蜂窝用户 C_i 上行链路或者下行链路时系统吞吐量增益

$$G_i^u = \log_2 \left(1 + \sum_{j=1}^N x_{ji}^u \frac{P_{Dj}^u g_{Dj} p_j}{\sum_{n=1, n \neq j}^N x_{ni}^u P_{Dn}^u g_{Dn} p_n + P_{C_i} g_{C_i} p_j + N_0} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P_{C_i} g_{B C_i}}{\sum_{j=1}^N x_{ji}^u P_{Dj}^u g_{B D_j} + N_0} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P_{C_i} g_{B C_i}}{N_0} \right) \quad (8)$$

$$G_i^d = \log_2 \left(1 + \sum_{j=1}^N x_{ji}^d \frac{P_{Dj}^d g_{Dj} p_j}{\sum_{n=1, n \neq j}^N x_{ni}^d P_{Dn}^d g_{Dn} p_n + P_{B} g_{B D_j} + N_0} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P_{B} g_{B C_i}}{\sum_{j=1}^N x_{ji}^d P_{Dj}^d g_{C_i} p_j + N_0} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P_{B} g_{B C_i}}{N_0} \right) \quad (9)$$

忽略直线传播损耗、多径传播以及多级衰落等因素,考虑到基站发射功率远远大于蜂窝用户发射功率, D2D 用户若在基站邻近区域选择复用下行链路,则 D2D 用户会受到较大的干扰,系统吞吐量增益不能最大化。结合式(8)(9),假设所有传输功率均为最大值,可以算出 G_i^u 和 G_i^d ,比较两者大小,即可确定 DU 复用 CU 的 f_i^u 或是 f_i^d 。具体规则为:如果 $G_i^u \geq G_i^d$,则 DU 复用 f_i^u ,反之,则复用 f_i^d 。

4 算法仿真结果及分析

表 1 仿真参数设置

参数名称	数值
小区半径/m	500
D2D 用户对数量	10, 20, ..., 100
蜂窝用户数量	5, 10, ..., 50
D2D 用户 SINR 阈值/dB	4, 6, 8, 10
蜂窝用户 SINR 阈值/dB	8, 10, 12, 14
D2D 最大通信距离/m	25
白噪声功率谱密度/(dBm/Hz)	-174
基站最大发射功率/dBm	46
蜂窝用户最大发射功率/dBm	23
D2D 用户最大发射功率/dBm	17
蜂窝用户链路路径损耗/dB	$128.1 + 37.6 \lg(d[\text{km}])$
D2D 用户链路路径损耗/dB	$148 + 40 \lg(d[\text{km}])$

通过设置仿真参数,根据本文提出的基于图论的 D2D 资源分配算法(GTRA)算法得出仿真结果,并与另外三种算法对比,对仿真结果进行分析。另外三种算法分别为:(1)随机图着色资源分配算法(RCA);(2)贪婪图着色资源分配算法(GCRA);(3)传统资源分配算法(CS)。其中,贪婪图着色资源分配算法利用贪心算法以提升频谱利用率为目的,获得最佳信道分配方案。传统资源分配算法通过启发式资源调度算法,实现了 D2D 用户与蜂窝用户的一对一资源共享,重点突出了信道分配的公平性。

仿真实验假定两个前提,首先是单小区场景,其次小区内的所有 DU 和 CU 均符合随机分布。具体仿真参数如表 1 所示。

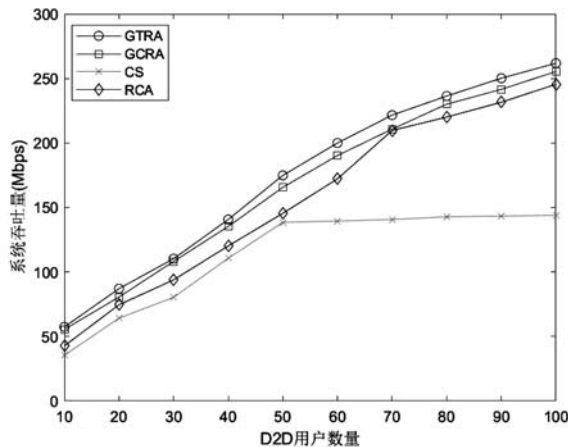


图 2 D2D 用户数量对系统吞吐量的影响

图 2 比较了在不同算法下 D2D 用户数量与系统整体吞吐量之间的联系。从图中容易看系统整体吞吐量与 D2D 用户数量正相关,原因在于 DU 可以复用 CU 资源,提升 D2D 用户的容量,而且在 D2D 用户较少的情况下,系统吞吐量增长率较高,而随着 D2D 用户不断增加,慢慢接近蜂窝用户的数量时,DU 与 CU 之间形成的累计干扰逐渐增加导致系统吞吐量的增长率放缓。从仿真的结果可以得出结论,本文所提出的 GTRA 算法使得多个 D2D 用户形成的 D2D 用户簇可以复用同一资源块,大大增加了系统吞吐量,而且不论 D2D 用户多少,该算法相较 GCRA 算法、CS 算法、RCA 算法均有更高的系统吞吐量。

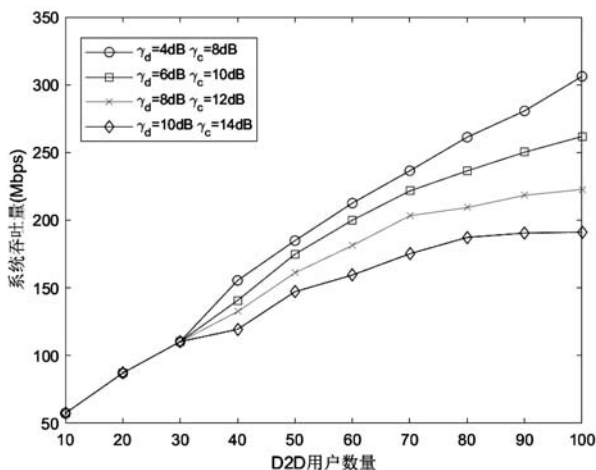


图 3 用户 SINR 对系统吞吐量的影响

图 3 为 D2D 用户 SINR 阈值与系统吞吐量的关系图。根据仿真结果可知,用户 SINR 阈值与系统吞吐量负相关,这是

由于用户 SINR 阈值与用户能否接入系统直接挂钩, SINR 阈值过低,无法保证用户之间的通信质量,而 SINR 阈值过高,则在同等信号功率下,受到的干扰必须非常小,否则用户之间无法建立通信链路,会从系统中被排除,如此系统吞吐量便会降低。同理,当 D2D 用户越来越多, D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰不断增大,满足高 SINR 阈值的用户减少更多,系统吞吐量下降得更快。因此可以从图中看出随着 D2D 用户增多,高 SINR 阈值比低 SINR 阈值系统吞吐量降低得更加明显。

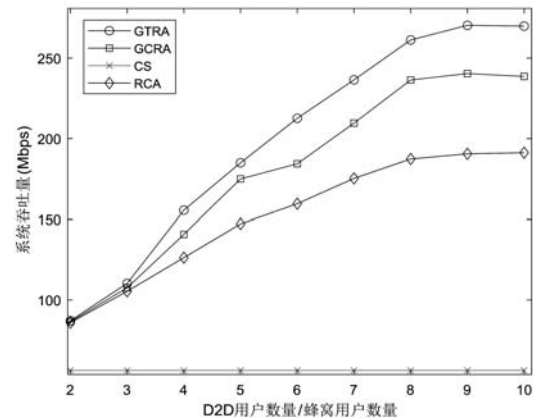


图 4 D2D 用户数/蜂窝用户数对系统吞吐量的影响

图 4 分析了蜂窝用户数量与系统吞吐量的关系。由图可以看出,随着蜂窝用户增加,系统吞吐量也稳步增长,这是因为蜂窝用户越多,可以分配的信道资源也越多,系统可以容纳更多 D2D 用户,吞吐量也随之增长。另外,当 D2D 用户数与蜂窝用户数之比较小时,4 种算法表现差异不大,但是随着比值不断增大,除了 CS 算法,其由于蜂窝用户与 D2D 用户之间的资源分配为一对一,故而完全不随比值变化,本文所提出的 GTRA 算法相较于 GCRA 算法、RCA 算法系统吞吐量的优势更加明显。原因在于 GTRA 算法采用了系统吞吐量增益确定 D2D 用户的复用模式,使得系统可以容纳更多 D2D 用户。最后当蜂窝用户与 D2D 用户的比值大于 8 后,系统吞吐量不再增长, RCA 算法甚至略有降低,简单分析可以知道当 D2D 用户密度过大,用户间干扰已达到难以协调的地步,系统吞吐量势必不可能继续增长,而系统也可能出现瘫痪的情况。

5 结语

D2D 用户的模式选择与频谱利用率之间有着紧密联系,在 BS 为 CU 分配完信道资源后,系统为了维持 D2D 用户通信,提高系统总吞吐量,会允许 DU 复用 CU 的资源,催生出了 CU 与 DU 之间的同频干扰。本文提出了一种基于最大权匹配的 D2D 资源分配算法,在满足 CU 和 DU 最低 SINR 的前提下,首先根据系统吞吐量增益这一指标,确定 D2D 用户簇复用上行链路资源或者下行链路,相较于传统的单一复用上行链路或者下行链路,不仅为 D2D 用户提供了更多的频谱资源选择,还可以提升频谱资源的利用率。

参考文献:

- [1] 王嘉麟.移动通信网中 D2D 通信的资源分配算法研究[D],吉林:吉林大学,2020.
- [2] 刘煜恒.面向 D2D 通信的干扰控制与功率分配算法研究[D],昆明:昆明理工大学,2021.
- [3] 朱国晖.基于图着色理论的全双工 D2D 分簇资源分配方案[J],计算机应用研究,2018,35(11):3382-3384.