



协同异构蜂窝层叠网络中的终端直通通信技术*

许晨,宋令阳

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘要:终端到终端(device-to-device, D2D)的直通通信实现了联合蜂窝和移动自组网的无缝操作,大幅提高了系统频谱效率和网络容量。介绍了 D2D 局域网的理论概念和在实践中的应用挑战;并着重论述了跨层资源管理在解决 D2D 通信中干扰避免问题的重要性,给出了一个无线资源管理实例。数据结果显示,所提出的算法性能接近穷举搜索最优算法,并具有相对较低的复杂度。目前, D2D 通信技术表现出能够获得系统高容量和充分利用无线资源的巨大潜力。

关键词: D2D 直通通信;无线资源管理; D2D 局域网

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.06.002

Device-to-Device Communication as an Underlay in Coordinated Heterogenous Cellular Network

Xu Chen, Song Lingyang

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Device-to-device (D2D) communication enables seamless operation of combining cellular and mobile Ad Hoc networks, which significantly improves the system spectrum efficiency and network capacity. The concept and application challenges of D2D local area network in theory and practice were introduced. The importance of cross layer resource management in solving interference avoidance of D2D communication was discussed, and an example of wireless resource management was also provided. The data results show that the performance of the proposed scheme is close to that of the exhaustive search optimal scheme, while has a relatively lower complexity. At present, D2D communication exhibits vast potential of achieving high system capacity and fully exploring wireless resources.

Key words: D2D communication, wireless resource management, D2D local area network

1 引言

1.1 背景

随着越来越多的新型移动多媒体服务可供移动用户选择,通信系统对高速无线接入数据速率的需求与日俱增,一些新的无线技术也应运而生。这类技术例如 LTE-A (long term evolution advanced, 高级长期演进)、WiMAX (world

interoperability for microwave access, 全球微波互联接入), 能够提供高速、大容量的移动服务,并同时保证用户 QoS (quality of service, 服务质量)^[1]。另一方面,蜂窝网络技术的发展推动了“小小区”、“微小区”等新型技术的产生,通过缩减小区尺寸和有效控制干扰达到提高网络容量的目的成为可能。然而,所有这些革新技术仍依赖于集中式的网络拓扑结构,需要移动设备通过 BS (base station, 基

* 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)青年科学家专题基金资助项目(No.2013CB336700)

站)或者接入点实现通信。这样的集中式网络拓扑往往受限于BS和接入点的承载能力,一旦存在巨大数量的通信请求,网络将可能发生拥堵。并且,BS和接入点可能没有设备之间完整的传输参数信息,给获得最优网络性能带来困难。为了应对这些问题,研究引入D2D(device-to-device,终端到终端)直通信的概念,它允许移动设备之间进行局部的点对点传输,从BS和接入点分担部分数据流量^[2]。

D2D通信作为蜂窝移动通信系统的下层进行工作,可与蜂窝网络使用相同的频谱资源以提高系统吞吐量^[3,4]。在LTE(long term evolution,长期演进)架构中,网络通过BS转发对MS(mobile station,移动台)提供服务,属于常规的蜂窝通信模式;而通过D2D直链路,具有通信请求的MS之间可执行彼此直接通信^[4]。从D2D通信发起时到连接建立,MS始终受BS控制,以保持处于网络受控的状态,随时可进入蜂窝通信模式。BS作为蜂窝链路和D2D链路的资源控制中心,可同时对D2D发射端的传输参数(例如发射功率和通信时长)设置约束,限制其对蜂窝接收端造成的同频干扰^[5,6]。

众多研究者和无线技术工程师认为,D2D直通信将发展成为下一代蜂窝网络支持的关键技术。具体说来,D2D通信具有以下优势:扩大服务覆盖区域;分担蜂窝网络流量;提升能量效率^[7];增大吞吐量和频谱效率;创造新型服务,例如社交/车载自组网服务等^[8]。

1.2 技术发展历程

从1995年至今,日新月异的服务需求促使无线蜂窝技术经历了第2代到第4代移动通信系统的重大演进,如图1所示。为了提升网络容量,每一代通信系统都对通信自由度进行了探索,包括频率、码字、空间等维度。自D2D直通信

引入以来,吸引了来自学术界和工业界的广泛关注,正是由于挖掘了一个新的通信维度——移动设备维度。

D2D技术最早出现在简单的设备到设备短距离通信中,例如移动电话之间通过蓝牙传输数据;之后出现了蜂窝网络控制的短距离通信以及使用注册频段的蜂窝控制下的D2D通信;最终,由于协作通信的应用需求,多跳接入方式的辅助,设备之间将可以通过彼此的直连进行多点间的高速数据传输和共享,发展为典型的局域网结构。这种通过设备直通信作为基本组成,多点间可协同配合传输以解决数据流量飙升问题的区域型网络,可称为D2D-LAN(local area network,局域网)。D2D技术发展历程如图2所示。对于场景A,蜂窝网络和D2D网络使用不同的RAT(radio access technology,无线接入技术)工作在不同的频段上,例如UMTS(universal mobile telecommunications system,通用移动通信系统)和Wi-Fi(wireless fidelity,无线保真)。场景B将移动设备的部分控制功能授权给BS和CN(core network,核心网),允许移动设备在注册和非注册频段之间智能切换。在场景C中,设备可形成一个工作在注册频段上的局域网,以实现前所未有的高灵活性和性能。

1.3 D2D-LAN 目标

D2D-LAN的核心目标是填补从物理层、MAC(media access control,媒体访问控制)层、网络层到应用层的理论和实际之间的空白,通过采取网络优化、信息处理等手段,设计无线蜂窝网络的架构和协议,以解决数据流量激增的现实问题。在通过连接蜂窝和移动自组网获得性能提升方面,D2D-LAN的主要贡献如图3所示,分为:

- 动态异构的底层配置;

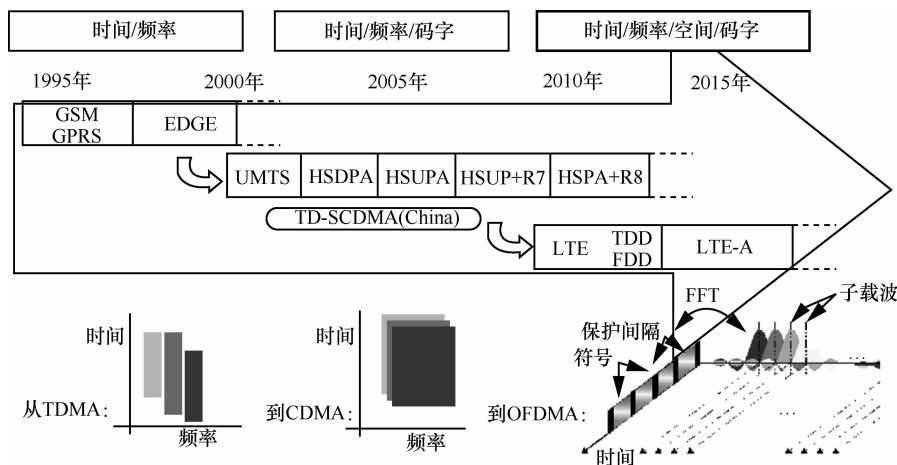


图1 基于探索新的通信维度的蜂窝技术演进

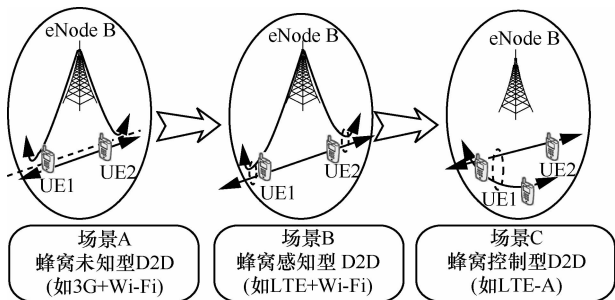


图2 无线 D2D 直通信发展历程

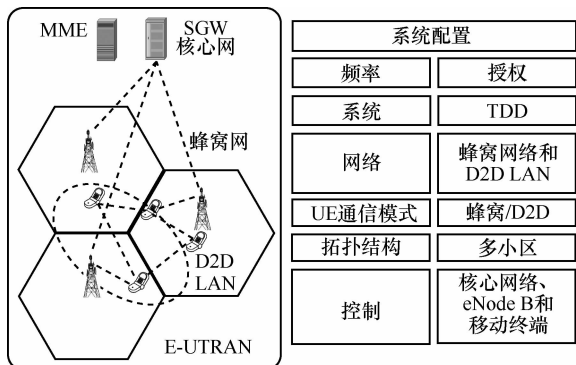


图3 D2D 局域网:系统模型和配置

- 频谱高效利用和干扰有效抑制的传输;
- 跨层资源管理。

对于系统配置,本文主要考虑 TDD(time division duplex, 时分双工)系统,它允许 D2D 用户在上行和下行使用相同的频段。D2D 和蜂窝网络之间的互联组网、运营商控制整个网络的方法将在后文中提出。另外,一些协议,如模式转换、设备发现、同步、移动管理、安全等也将针对性地展开讨论。

D2D 直通信技术的实施难题之一,是在对传统蜂窝网络不构成严重干扰的前提条件下,实现 D2D 网络中有效的数据传播。功率控制、合作传输以及多址接入技术需要新的场景中研究;无线网络编码被认为是一种有效提升网络性能(频谱效率)的方法。因此,如何利用这些技术值得进行更深入的研究。

由于设备维度的引入,OFDMA(orthogonal frequency division multiple access,正交频分多址接入)网络优化问题变得更为复杂。在一般的 D2D 场景中,多对 D2D 用户可与蜂窝用户同时存在,如何有效地协调空间、时间、频率、功率和设备变得尤为重要。另外,D2D 通信面临的其他挑战包括:有效服务的识别、D2D 链路的无限资源分配和管理、自组织 D2D 链路、基于位置靠近的网络卸载以及 D2D 通信的容量和性能评估。最后,许多基于 D2D 技术的应用也

值得深入的研究,例如无线社交网络、车载自组网甚或机器类型通信。

2 D2D-LAN 通信技术的挑战

为了确保和已存在的蜂窝网络达成互通性,D2D-LAN 将面临亟待解决的重要问题。下面将给出一些针对性的分析。

2.1 接入方式

D2D-LAN 系统有 3 种配置方式,可以允许或禁止用户接入。

- 网络控制 D2D-LAN:在这种场景下,基站和核心网控制通信信令的设置和交互。这种集中式的配置方式可以从全局角度有效抑制干扰、优化资源管理。然而,当 D2D 链路数量增大,这种方式需要更大数量的控制信令以及 CSI(channel state information,信道状态信息)反馈,这无疑会造成频谱效率的下降。因此,这种完全网络控制型的方式适合于 D2D 链路数量较小的场景。
- 自组织 D2D-LAN:D2D 用户自发地通过发现频谱空洞进行自组织方式的通信。这种配置方式类似于认知无线电,它允许 D2D 用户感知周围环境,获取 CSI、干扰以及蜂窝系统信息。这种分布式的方法能有效防止控制信令过载和时延,但自组织的通信形式可能会造成通信混乱。
- 网络辅助 D2D-LAN:这种方式由以上两种 D2D 配置方式构成。D2D 用户以自组织方式运作,同时和蜂窝系统交换有限的控制信息,进行资源管理。另外,为了更好地控制系统,蜂窝网络能够获得 D2D 通信的状态。

2.2 容量界

容量界是 D2D-LAN 工程的主要关注点之一,根据系统的重点场景,研究主要包括以下内容。

- 集中式的 D2D-LAN:完全由 BS 控制的 D2D-LAN 和蜂窝网络的容量。
- 分布式的 D2D-LAN:分布式 D2D-LAN(和蜂窝网络仅有有限的信息交互)和蜂窝网络的容量。
- 认知型 D2D-LAN:伴有认知技术协助的自组织型 D2D-LAN 和蜂窝网络的容量。

2.3 模式转换

如图 3 所示,所有的 MS 实行两种模式,即蜂窝模式和 D2D 模式,并能够自适应地采取合适的方法进行传输。

- 蜂窝模式:移动设备工作在传统的蜂窝制式下,依赖 BS 转发数据。
- D2D 模式:移动设备直接交换数据信息。
- 自适应模式:移动设备可根据预定义的标准选择合适的模式进行通信。

2.4 设备发现和同步

对于蜂窝网络,移动设备能够在上行通信中通过调整定时超前轻松地进行同步;而对于 D2D 通信,同步过程变得较为复杂。在 D2D-LAN 中,网络时间同步在蜂窝网络和 D2D 用户之间、D2D 用户彼此之间,都是非常必要的,它有助于最小化多址干扰以及获得合适的切换性能。没有定时过程,传输间隔点将在 D2D 用户和蜂窝网络之间发生变化,这会导致 D2D 的传输时间段和蜂窝网络下行重叠,增加网络中的同频干扰。最近,相关方面的工作提出一种设备信标方案,能够帮助服务和设备发现,同步也能通过设备搜索实现。另外,在 IEEE 802.11 协议中,已经有一些方法可以解决移动设备间的同步问题。

2.5 移动管理

在蜂窝网络中,当用户进入相邻小区覆盖区域时将触发小区切换动作。然而,给定 D2D-LAN 的覆盖区域,切换动作的发生更频繁,随之网络信令开销增大。因此,需要不同的切换管理程序协调用户驻扎在邻近 D2D 网络的时间。一个分层的小区结构如图 3 所示,图中定义了一个移动 D2D-LAN 层,可用于区分蜂窝和 D2D 网络。通过这种方式,可减小跨层信令开销,同时缩减正在进行切换的用户观测到的邻小区和 D2D-LAN 列表,特别适用于自组织接入型 D2D 通信。

2.6 干扰感知的传输

2.6.1 干扰分析

D2D 网络在向用户提供覆盖服务的同时,也辐射到邻

近的移动用户,带来不可避免的信号干扰。由于 D2D 通信的典型应用在宏蜂窝/微蜂窝的覆盖区域,D2D 通信将引起蜂窝网络性能的高度衰落;另外,新产生的 D2D 链路也会干扰已经存在的 D2D 通信的正常运作。为了减少蜂窝网络盲区出现,并成功构建 D2D-LAN,干扰避免、消除技术需要得到重视和应用。

下面假设 D2D 用户和蜂窝网络以及 D2D 用户彼此之间实现同步化,并将网络定义为两个分离的层结构(D2D 层和蜂窝层),干扰类型可划分为跨层干扰和同层干扰。

- 跨层干扰:干扰的侵略方(例如一个 D2D 用户)和受害方(例如一个蜂窝用户)属于不同的网络层。
- 同层干扰:干扰的侵略方(例如一个 D2D 用户)和受害方(例如一个位置邻近的 D2D 用户)属于相同的网络层。

为了克服干扰的影响,消除技术现已被提出,但由于消除过程中错误的时有发生仍得不到重视^[1]。多天线波束成形被看作一种减小干扰的手段,它是一种基于硬件的通过减少干扰源数量达到干扰抑制目的的方法。此外,基于干扰避免的策略也被认为是有效的抗扰方法,例如功率控制、频谱资源管理等。

功率控制和无线资源管理是常被用于蜂窝系统减小干扰的有力工具。如果不使用任何抗扰方法,距离基站较远用户的有用信号将被与其距离较近的用户信号淹没。这些抗扰技术在 D2D 通信中也是必要的,不仅是以上原因,D2D 还带来了跨层干扰问题。

2.6.2 功率控制

如图 4 所示,为了简化分析,将 D2D-LAN 简化为一个 D2D 通信对和一个蜂窝用户共存的场景。不失一般性,图中展示了上行传输时隙。功率控制可涵盖以下两种方法。

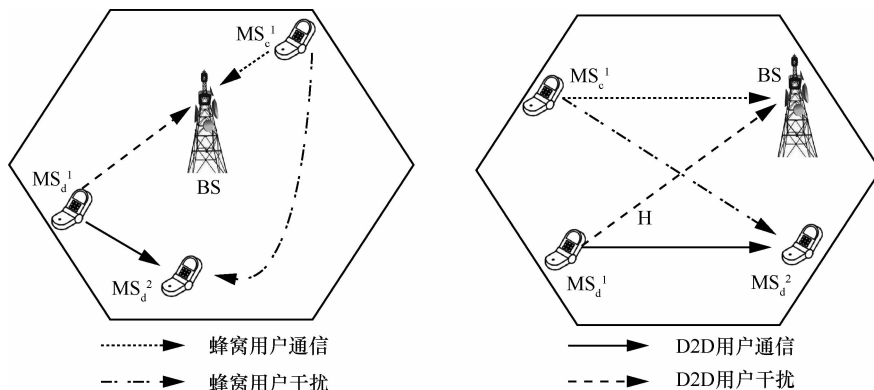


图 4 D2D 局域网的简化模型:一对 D2D 工作在蜂窝网络上行时隙



- 自组织型功率控制: D2D 用户以自组织方式进行功率变更, 依据一个预定义的 SINR(signal to interference and noise ratio, 信干噪比)门限满足自身 QoS 要求, 同时不影响蜂窝用户通信。
- 网络管理型功率控制: 蜂窝和 D2D 用户自适应地根据当前 SINR 调节发射功率。在一个典型场景下, D2D 用户首先控制发射功率, 接着蜂窝用户根据干扰状态改变功率。这样的过程经过数次迭代后在满足所有用户 SINR 要求时终止。

第一种方案不会对蜂窝用户造成影响, D2D 用户的操作对其是无形的。这种方法虽简单, 但并没有第二种方案有效。然而, 网络控制型方案需要一些信令开销, 存在蜂窝用户、D2D 用户以及基站之间的信息交互。

2.6.3 MIMO 和虚拟 MIMO

BS 和 MS 端多天线技术的使用能够减少对其他用户造成的同频干扰, 发射和接收端波束成形是一个典型的应用实例, 可总结为以下几种类型:

- BS 波束成形: 这种类似于多用户 MIMO (multiple input multiple output, 多输入多输出) 的方法可工作在蜂窝下行时隙, 以减小对 D2D 用户的干扰, 使下行资源共享的 D2D 通信成为可能。否则, 由于 BS 的下行发射功率对 D2D 通信来说过高, 使得 D2D 只能工作在蜂窝网络上行时隙。
- D2D 用户波束成形: 这种方法防止 D2D 通信干扰蜂窝用户和其他 D2D 用户的通信质量。
- 虚拟 D2D 波束成形: 这种方法借鉴了协作移动的概念, 多个 D2D 用户合作式形成波束成形矩阵, 提升整个系统性能。

2.7 无线网络编码

网络编码(network coding, NC)作为一种新型的信息处理和传输技术, 开始出现在多跳多用户无线网络中。在参考文献[9]中, 一种基于放大转发协议的网络编码方法被提出, 称为模拟网络编码(analog network coding, ANC)。目前, 大部分协作通信协议坚持不同的用户分离使用不同的正交信道(正交时隙、频率或扩频码), 这些方法事实上属于物理层路由机制。网络编码作为一种新型的网络信息传输策略, 允许来自不同信源(或发送至不同信宿)的信息在中间节点混合。

相比于传统的路由机制, 网络编码允许信息处理过程发生在中间节点, 能够获得一定的性能增益, 如能量效率、公平性、顽健性、覆盖率等。虽然网络编码最初由无差错计

算机网络提出, 但其原理同样能应用于实现协作通信。

2.8 安全

在 D2D-LAN 中, 隐私和安全同样扮演着重要的角色。安全通信的目标是使合法信宿成功接收到信源信息, 而窃听者、不受信任甚至恶意窃听的中间移动用户不能解读这些信息。这类安全问题可通过以下方法解决: 高层加密和物理层安全。

高层加密方法已被广泛使用, 信源和信宿移动用户能够直接通过 BS 传送密钥, 确保中间节点不能完全解码接收到的信息。

此外, 系统也能采取物理层方法提升通信安全性。

物理层安全的基本思想是利用无线信道的物理特性安全地传递信息。这类工作最先由 Wyner 提出, 他引入了窃密信道的概念, 并建立了不依赖私(密)钥而创造理想安全通信链路的可能性。本文指出 D2D-LAN 安全通信的方法包括以下两种。

- 信号处理技术: 运用信号处理技术设计和提升物理层安全, 例如发送波束成形、合作信令传输等。
- 资源分配方案: 基于物理层安全的考虑, 使用分布式资源分配方法(例如博弈理论)分析和设计无线网络, 例如非合作博弈、合作博弈、分布式拍卖博弈、联盟博弈等。

另外, 中继协议的选择同样是影响系统安全性能的重要内容, 例如放大/解码/解调/压缩/编码—转发。

2.9 计费 and 激励机制

D2D 通信的计费对于运营商是至关重要的, 它可通过监测来自 D2D 用户的控制信息反馈实现, 如监测通信时长。并且, 所分配的无线资源量可作为衡量 D2D 通信的另一个有效指标。

另一个重要问题是如何激励移动用户作为中继信息的中间节点进行工作。博弈论被看作保护智能电网通信基础设施的一项重要工具, 它可以通过连接状态估计、电力调度、电力定价引导攻击者和防御者的行为。迄今为止, 这项技术已广泛应用于经济学、政治学、心理学等学科。最近, 博弈论也被用于研究通信网络中的激励问题, 这意味着博弈论也可以成为帮助建立 D2D-LAN 激励机制的一个有利工具。

3 跨层资源管理

3.1 频谱共享

简单说来, 频谱共享主要分为以下两种方式。

- 机会式(overlay)频谱共享: D2D 用户占用空白的蜂窝频段进行通信。这种方法将注册频段分为两部分(正交信道分配),完全排除了跨层干扰。在这种方式下,子信道的一部分被蜂窝用户占用,另一部分由 D2D 网络使用。虽然这种方式完全避免了跨层干扰,但在提高频谱复用率方面却是无效的。
- 覆盖式(underlay)频谱共享: 这种方式允许多个 D2D 用户和一个蜂窝用户工作在同一频段上,从而提升频谱效率。蜂窝和 D2D 用户的同频分配对于运营商来说更为高效和有利,从技术的角度出发也更为复杂。

比较而言,机会式共享容易实现,但可能频谱效率低。覆盖式共享要求相对较大的信令开销和控制信息,但可以获得更好的系统性能。对于覆盖式方法,为了消除同层/跨层干扰,系统需要有一个中央实体负责智能地通知每个通信单元使用哪些子信道。该实体需要收集来自 D2D 用户的信息,并据此在短时间内找出一种最优或次优的解决方案。大量 D2D 用户的存在以及允许多个 D2D 用户和蜂窝用户共享相同频谱,使优化问题变得更加复杂;当家庭基站和中央控制实体进行通信时,又将出现时延问题。因此,在这种情形下,一个分布式的消除同层/跨层干扰的方法(D2D 用户可以管理自己的子信道)将更适用。在非合作的解决方案(即自组织方法)中,每个 D2D 用户以最大化吞吐量和 QoS 为目标自行选择子信道。这种方案不顾及分配结果对同频 D2D 和蜂窝用户产生的影响,即便可能会造成相当大的干扰。这样,子信道的接入变成机会式接入,方案可能退化为贪婪式算法。另一方面,在合作的解决方案(网络辅助式方法)中,D2D 用户能收集到子信道占用情况的部分信息,并可据此考虑自身可能对其他同频用户造成的干扰,进而选择子信道。在这种方式中,蜂窝和 D2D 用户的平均吞吐量、QoS 以及其整体性能均得到了优化。

3.2 频率/时间/设备维度的优化

D2D 通信的应用引入了另一个通信维度,即设备端自由度,以提高蜂窝网络的频谱效率。虽然 D2D 通信带来了频谱效率和系统容量的提升,但由于频谱共享,它同时给蜂窝网络造成了干扰。因此,必须制定有效的干扰协调方案以保障通信的目标性能。以往的工作表明,通过合适的资源管理策略,D2D 通信能够有效提升系统吞吐量,同频干扰可以得到有效限制。然而,将蜂窝资源分配给 D2D

用户传输数据具有相当高的复杂度,并且很少有研究工作考虑多个 D2D 对与一个蜂窝用户共享相同频谱资源的情况。

参考文献[4]提出了一种反向迭代组合拍卖作为 D2D 通信频谱资源分配机制,它允许多个用户对共享同一频段。这种拍卖算法在性能表现上远远优于随机资源分配,其复杂度低于穷举最优选择算法。并且,拍卖机制提供了较高的分配效率,其在不同的用户和资源参数下表现稳定。

时间维度上的优化体现了系统的公平性,在现有的研究中,一些常见的通信调度算法,如轮循(round robin)、最大载干比(max carrier-to-interference ratio)、比例公平等同样应用于 D2D 通信网络中,解决了在资源稀缺情况下时间维度上的优化问题。

3.3 高效传输

D2D 直通通信的优势之一是降低移动设备的发射功率,这受益于 D2D 通信本身的场景特点——短距离数据传输。因此,处于直通通信模式的设备应具有相对较高的能量效率。然而,资源共享带来的干扰、功率的调控,必然影响用户的能效表现。能效问题的解决方案对应于以提高整个系统的能量效率为目标的联合无线频谱资源和功率分配。频谱资源管理以多对 D2D 用户与蜂窝共享频谱为优化目标,而能效问题主要关注发射功率的控制和分配。

3.4 信令开销的缩减

D2D 通信的应用难题之一是如何降低信令开销,这很大程度上取决于接入方式。对于完全网络控制型接入,集中式的管理机制可以获得最优的系统性能,但需要从 D2D 链路反馈大量的信令报告。另一方面,虽然自组织型接入具有较高灵活性和易操作性,但这种分布式的接入方法会对蜂窝网络造成干扰。因此,结合上述两种方式的优点,网络辅助型接入的设计允许蜂窝网络部分地参与通信,向 D2D 用户传递一些资源管理和控制信令,优化系统性能。

4 资源分配实例

前文提到有效的资源分配方案可以降低同频干扰对 D2D-LAN 性能的影响,本节给出一种基于博弈论的频谱资源分配算法——反向迭代组合拍卖。

博弈论提供了一系列数学工具以研究相互依存的理性玩家之间复杂的互动关系,并预测他们的策略选择。基



于组合拍卖的资源分配机制允许竞拍者一次性收购若干资源的组合包,而并不只是个体资源单位。组合拍卖激励竞拍者充分表达他们的喜好,这有利于提升系统效率和拍卖收益。基于此,应用组合拍卖的目标是解决任意数量的D2D通信链接复用同一蜂窝频段的问题。然而,在组合拍卖中存在一系列的问题和挑战,例如定价和拍卖规则、WDP(winner determination problem,获胜者确定问题)。一些文献提到,WDP将导致NP难问题。因此,本文关注一种演进机制——ICA(iterative combinatorial auction,迭代组合拍卖),这种机制允许竞拍者多次迭代地提交竞标,拍卖者计算临时分配结果并在每一轮竞拍中要价。

ICA的设计,特别是集中式的ICA设计,通常基于要价机制。这里提出的算法使用线性价格规则,它容易被竞拍者理解,并且方便在每一个回合中通信。多个D2D用户对的组合可看作一个“物品包”;蜂窝信道在被D2D占用后可获得额外的信道速率增益,故看作收购物品的“竞拍者”。D2D通信需要耗费信令传输代价并引入同频干扰代价,在拍卖中抽象地用价格衡量代价的多少。由于来自D2D链路的干扰,蜂窝信道需要在D2D接入之前确保蜂窝系统的性能,只有代价不至于影响本身性能的前提下才进行竞拍。因此,本方案考虑使用一种降价标准。价格通过一种贪婪模式进行更新:一旦有竞拍者提交申请竞拍,对应竞购物品的价格则固定;否则对应物品降价。拍卖过程迭代进行,直到所有的D2D通信链路均拍卖掉或所有蜂窝信道赢得一个物品包,则拍卖结束。

不同资源量下的系统和速率如图5所示。可以看到,系统和速率随着资源量的增加而上升。在几种不同分配算法中,穷举搜索最优选择(exhaustive optimal)算法给出了和速率的上界。R-ICA(reduced reverse ICA)是本文所述的反

向迭代组合拍卖算法,简化R-ICA算法是将共享同一蜂窝信道的D2D用户对数量限制为一。可以看出,R-ICA算法性能远高于随机分配(random allocation);最优分配给出最高的系统和速率,但这种优势相比于R-ICA算法是相当微小的,特别是当蜂窝资源量增大的时候。

5 结束语

异构层叠网络下的D2D通信技术实际上是利用设备维度的拓展,在原有无线通信网络基础上进一步地增大频谱利用效率、提升系统容量。为了获得联合蜂窝和移动自组网整体性能的提升,D2D-LAN的设立主要涵盖3部分工作,以覆盖物理层、MAC层、网络层和系统层,它们包括:动态异构的配置、频谱效率、干扰避免传输以及跨层资源管理。由于层叠型网络部署的主要限制是干扰问题,研究的重点将放在频谱分配和干扰避免技术上。特别的,D2D-LAN也将应用近年来无线通信中的先进技术以保证网络性能,这些技术包括无线网络编码、效用优化、拥塞和接入控制、博弈理论、物理层安全等,D2D通信技术表现出能够获得系统高容量和充分利用无线资源的巨大潜力。在未来研究中,基于D2D通信的无线技术,例如移动社交网络、车载自组网,将进一步拓展直通技术的应用,构建具有协同异构层叠特性的下一代无线网络。

参考文献

- 1 Song L and Shen J. Evolved Network Planning and Optimization for UMTS and LTE. Auerbach Publications, CRC Press, 2010
- 2 Doppler K, Rinne M, Wijing C, *et al.* Device-to-device communication as an underlay to LTE-Advanced networks. IEEE Communications Magazine, 2009,47(12):42~49
- 3 Yu C H, Doppler K, Ribeiro C, *et al.* Resource sharing optimization for D2D communication underlying cellular networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011,10(8):2752~2763
- 4 Xu C, Song L, Han Z, *et al.* Resource allocation using a reverse iterative combinatorial auction for device-to-device underlay cellular networks. Proceedings of IEEE Globe Communication Conference (Globecom), Los Angeles, USA, Dec 2012
- 5 Janis P, Koivunen V, Ribeiro C, *et al.* Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlying cellular networks. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference 2009-Spring, Apr 2009

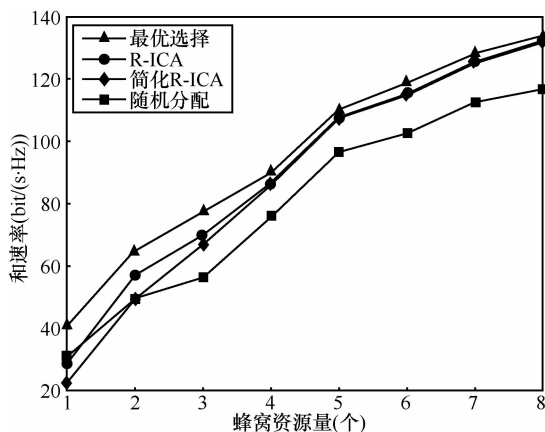


图5 不同分配算法得到的系统和速率