



全双工 D2D 通信关键技术及进展

丁家昕¹, 冯大权², 钱恭斌², 张楠²

(1. 国家无线电监测中心, 北京 100037;

2. 深圳大学, 广东 深圳 518060)

摘要: D2D (device-to-device) 通信由于直通链路距离短, 可以带来信道增益、复用增益和跳数增益, 对提高蜂窝网络的频谱效率和能量效率有很大帮助。同时同频收发的全双工通信可提升 D2D 通信的性能, 被广泛认为是下一代蜂窝网络的关键技术之一。首先概述了全双工 D2D 通信的特点, 结合未来 5G 通信系统的需求阐明了其重要性并介绍了其主要应用; 然后论述了全双工 D2D 通信资源分配的研究现状和存在问题; 最后, 探讨了全双工 D2D 通信的未来研究方向并进行了总结。

关键词: D2D 通信; 全双工通信; 频谱共享; 干扰管理; 资源分配

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018180

Full-duplex device-to-device communications: key technologies and prospects

DING Jiabin¹, FENG Daquan², QIAN Gongbin², ZHANG Nan²

1. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

2. Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: Due to the physical proximity, D2D communications can bring proximity gain, reusing gain and hop gain, and thus can potentially increase system spectral-efficiency and energy-efficiency. Full-duplex D2D communications, which enable the transceiver to simultaneously transmit and receive in the same band, can further improve the system performance. Therefore, full-duplex D2D communications has being considered as one of the key techniques in the next generation cellular networks. The features of full-duplex D2D communications and the significance in 5G systems were briefly introduced as well as its applications. Then, the state-of-art research on full-duplex D2D resource allocation was presented and discussed. Finally, some research topics that deserve further study was outlined and concluded.

Key words: D2D communication, full-duplex communication, spectrum sharing, interference management, resource allocation

收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2018-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61701317); 广东省自然科学基金资助项目 (No.2017A030310371); 深圳市基础研究项目 (No.JCYJ20170302150006125)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61701317), Guangdong Natural Science Foundation of China (No.2017A030310371), Shenzhen Basic Research Program (No.JCYJ20170302150006125)



1 引言

21 世纪,以智能通信终端为代表的电子信息 technology 蓬勃发展,手机已成为人们生活的必备产品。根据国际电信联盟的最新统计数据^[1],截至 2017 年底,全球蜂窝移动通信用户数已高达 77 亿,渗透率为 103.5%,远超固定电话和固定互联网宽带接入的渗透率。工业和信息化部数据也显示^[2],在 2017 年,随着 4G 的大规模商用,我国的移动互联网接入流量消费高达 246 亿吉比特,全年每月户均移动互联网接入流量达到 1 775 MB,其中通过手机上网的流量占到总流量的 95.6%。然而不断增长的用户数量以及人们对更高服务质量的追求与有限的频谱资源的矛盾也越发突出。据国家无线电监测中心预测^[3,4]:到 2020 年,根据现有频谱规划,中国 5G 频谱缺口将高达 600 MHz。此外,各类应用程序特别是视频、游戏、导航等高耗能业务在智能终端的蓬勃发展,使得移动终端的电池能量消耗日益攀升。然而,由于受到尺寸和内部空间的限制,移动终端电池容量往往有限,这严重影响了用户的服务体验,阻碍了高耗能业务的发展。因此,未来如何充分利用资源,提高无线通信系统的频谱效率和能量效率成为 5G 网络面临的难题,同时也是目前学术界和产业界关注的焦点^[5-7]。

为了解决这些难题,国内外研究人员提出了很多方案思路,例如采用异构网络和超密集网络架构^[8],通过大量部署小型基站 (small cell) 来提高系统容量和用户体验。但部署小型基站需要大量资金投入,且选址和维护也是运营商需要面对的难题^[9]。而终端直通 (device-to-device, D2D) 通信技术^[10],在不需运营商额外投资的情况下,通过邻近的节点,使用授权频段、不经过基站的中继而直接进行信息传输,提升网络性能,受到广泛关注^[11]。

与此同时,随着自干扰消除技术的进步^[12-14],无线同频同时全双工通信也引起了研究者的广泛

关注。相比半双工通信,全双工通信能潜在地提升一倍频谱效率,实现更加灵活的频谱使用,同时降低端到端时延,因此也被广泛认为是下一代通信系统中提升无线频谱效率的重要方向^[15-19]。

由于 D2D 通信中的发射功率较小,从而避免了待接收的有用信号被自身发射信号淹没,这一点对于全双工通信十分有利^[16]。此外,在 D2D 通信的应用中,通常通信双方要相互交换信息,有着双向的流量,特别适合进行全双工通信。因此,二者的结合吸引了国内外众多研究者的注意^[16,19]。

基于同时同频收发的全双工通信可以进一步提升 D2D 通信的性能,但也给现有网络带来了更加复杂的用户间干扰和自干扰^[19],而干扰影响接收信号质量,如果不能得到有效控制,会严重损害网络的总体性能和用户服务体验。因此,D2D 资源优化配置和干扰管理机制一直是业界研究的重点^[16-20]。

2 全双工 D2D 通信的特点及应用

与传统基于基站中继的通信方式不同,D2D 通信允许邻近的节点使用授权频段直接进行数据传输,这样可以带来如下三大增益。

(1) 信道增益

与传统蜂窝网络中基站与用户间的通信链路相比,D2D 通信链路距离短,路径损耗较小,特别当用户到基站的链路处于深度衰落状态或通信双方都处在小区边缘时,D2D 通信带来的信道增益就十分明显。

(2) 跳数增益

不同于传统的蜂窝基站中继通信,数据从源节点传到目的节点至少需要经过上行和下行两次传输。D2D 直通链路,数据只需一跳,便可完成从源节点到目的节点的传输,从而节约大量的传输资源。

(3) 复用增益

D2D 直接通信链路距离较短,发射功率小,

对与其共享频谱资源的用户干扰小。因此,可以与距离较远的蜂窝用户复用频谱资源,增大资源利用效率,同时也不损害双方的通信质量。

近些年来研究表明,通过天线隔离技术以及模拟域、数字域的干扰消除,全双工通信可以潜在提升一倍频谱效率^[15-19]。此外,全双工 D2D 通信可以最大限度提升用户收发设计的自由度,适合频谱紧缺和碎片化的多种通信场景。因此,相比于半双工 D2D 通信,全双工 D2D 通信可以额外带来双工增益,从而进一步提升网络资源利用效率。

高速率、高连接数和低时延等指标是 5G 通信系统的核心性能指标。D2D 通信的信道增益有助于提高 5G 系统的数据传输速率;其跳数增益、复用增益及双工增益可节省大量的传输资源,并通过本地通信分流核心网的流量负载,降低拥塞风险,有助于接入更多的用户;而且,信道增益、跳数增益及双工增益可以降低信息端到端的传输时延。

全双工 D2D 通信也有助于实现 5G 系统高频谱效率和高能量效率的需求。其信道增益、跳数增益、复用增益和双工增益可提高系统总体频谱效率并减少用户的能量消耗,其高效的频谱利用,可显著增加接入用户数,从而减小未来超密集网络中基站的部署密度,降低网络复杂度和成本。可见,为实现 5G 系统高速、可靠、绿色和个性化的服务愿景,全双工 D2D 通信可发挥重要的作用。

随着智能手机、平板电脑、可穿戴设备等智能终端的普及和基于用户地理位置信息业务(location based service, LBS)的兴起,全双工 D2D 通信的应用日益广泛,举例如下。

- 基于全双工 D2D 通信的信息共享:人们可以基于全双工 D2D 通信的本地传输,利用较短传输时延,交换视频、图片等多媒体文件及其他社交网络应用信息,改善用户服务体验,同时减轻基站负载。

- 基于全双工 D2D 通信的车辆通信:车辆间利用较短的传输时延,及时交换路况、车速等信息,提高信息传输的时效性。
- 基于全双工 D2D 通信的中继传输:通过全双工 D2D 中继的帮助,用户与基站间的传输链路长度将大大缩短,特别是当用户处于深度衰落环境下或小区边缘时,传输速率将有明显提升。

除了商业应用,全双工 D2D 通信还能在紧急救援和公共安全领域发挥其特有的优势。当蜂窝移动通信系统被地震、飓风等灾难事件严重破坏时,邻近终端仍可通过全双工 D2D 通信进行信息交互,提高了移动通信系统的顽健性。图 1 展示了全双工 D2D 通信在这些方面的应用。

3 全双工 D2D 通信研究现状

全双工 D2D 通信技术在为用户提供高速率、低功耗、低时延的近距离通信服务的同时,也使蜂窝系统的电磁环境更加复杂,从而增加了网络资源优化的难度。因此,有效的资源分配机制和干扰抑制技术是利用好全双工 D2D 通信的关键所在,目前的研究工作也主要集中在这一方面。

3.1 全双工 D2D 直通通信资源分配

功率控制是简单有效的干扰控制方法。可以通过限制 D2D 用户的最大发射功率,例如,基于功率裕度(power margin)因子来进行功率分配,从而减小 D2D 用户对普通蜂窝用户的干扰^[21,22]。然而在实际的网络中,功率裕度因子的设置是个难题,较大的功率裕度因子值,会使满足此值的普通蜂窝用户较少,而较小的功率裕度因子值,又会造成 D2D 用户的服务质量下降。参考文献[23]提出了启发式资源分配算法,保证 D2D 用户和普通蜂窝用户的服务质量,但该算法在进行 D2D 用户和普通蜂窝用户的信道配对时,只考虑了用户的瞬时信道信息,未考虑 D2D 用户和

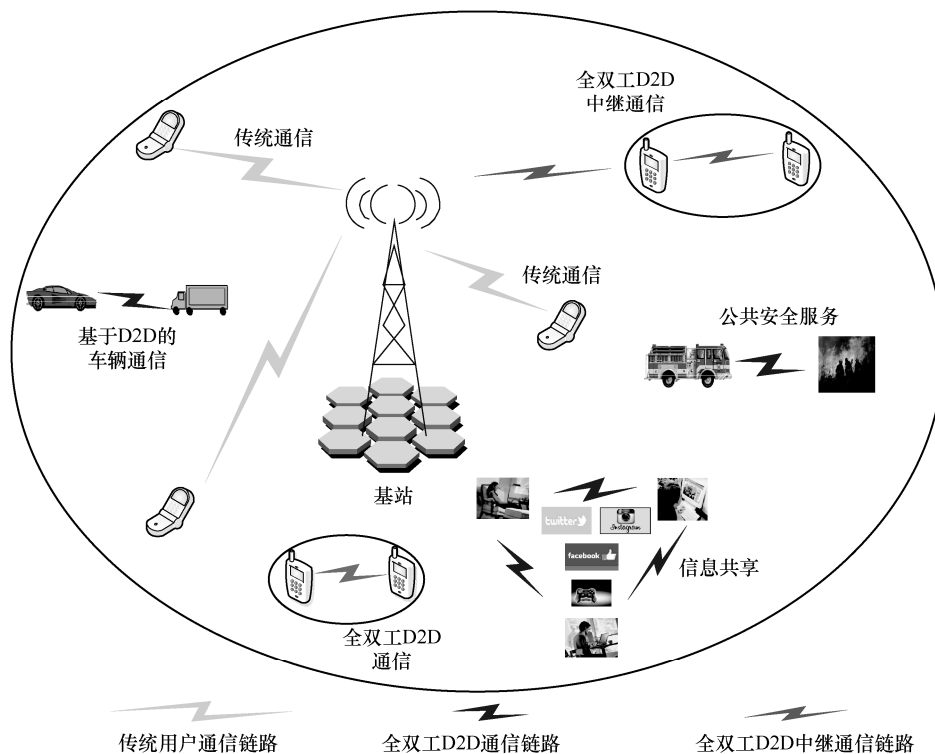


图1 蜂窝网络中全双工 D2D 通信的应用

普通蜂窝用户间的功率协调,造成实际结果与最优结果间的巨大差异。基于此,参考文献[24]考虑了多对 D2D 用户和多个普通蜂窝用户共享上行链路频谱资源的场景,在保证所有普通蜂窝用户和可接入网络的 D2D 用户最小信干噪比 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) 前提下,设计了一个跨层优化资源分配算法,该算法以最大化系统总体吞吐量为目标。仿真表明,算法能显著提高网络中 D2D 用户的接入率和系统总体吞吐量。

合理地调配时域、频域和空域资源,可以有效地减少用户间干扰。参考文献[25]提出利用跳时机制来分散 D2D 用户在同一时间上的干扰并减小用户远近效应;参考文献[26]提出利用着色理论来避免相互间干扰严重的 D2D 用户使用相同的信道;参考文献[27, 28]利用匹配理论来优化 D2D 用户和普通蜂窝用户间的信道配对。在空域方面,参考文献[29-31]提出干扰限制区域的概念,通过

限制普通蜂窝用户和 D2D 用户间的最小距离,减小相互之间的干扰。此外,还有基于博弈论的资源调度算法,如参考文献[32]中提出的第二价格连续竞拍机制、参考文献[33]中的反向迭代组合拍卖以及参考文献[34]中的斯塔克尔伯格博弈等。

在 D2D 通信中,用户可以采用正交模式、复用模式和基站中继模式^[35,36] 3 种不同的传输模式进行通信。更多的通信传输模式,意味着更多的通信自由度,因此有助于提高网络性能。参考文献[35,36]设计了以最大化网络频谱效率和能量效率为目标的最优模式选择算法。仿真表明,经过最优模式选择的 D2D 通信能显著提高系统的频谱效率和能量效率。

以上这些功率控制算法、调度机制和模式选择方案虽然能提高网络性能,但大部分研究只考虑 D2D 通信的半双工通信模式,全双工 D2D 通信的资源分配有待进一步研究。

针对网络中全双工 D2D 用户直通通信场景,

在参考文献[37, 38]中, 分别给出了最大化网络遍历容量和保障用户时延服务质量的最优功率分配算法, 没有考虑 D2D 用户复用普通蜂窝用户的资源。参考文献[39]针对网络中多对全双工 D2D 通信节点复用蜂窝用户上行链路频谱资源的系统总体吞吐量最大化问题, 提出了基于点着色理论的联合时频资源块和功率分配方案, 仿真结果显示该方案能达到近似最优的结果并显著降低计算复杂度。参考文献[40]针对网络中全双工 D2D 通信节点大规模部署的场景, 利用随机几何理论分析了网络中用户的中断概率性能, 并指出网络中所有 D2D 用户都工作在全双工模式并不是最优的选择。类似地, 在参考文献[41]中, 利用随机几何理论分析了网络中全双工 D2D 通信带来的吞吐量提升, 并提出了动态蜂窝链路保护机制, 避免全双工 D2D 用户对普通蜂窝用户的干扰。值得注意的是, 以上参考文献并没有涉及多对 D2D 用户场景下, 联合用户双工模式选择、用户接入控制、功率控制和信道分配的跨层资源分配优化方案, 因此有待进一步研究。

3.2 全双工 D2D 中继通信资源分配

参考文献[42]给出了在不同双工模式下最大化用户频谱效率的功率分配策略, 但未考虑用户的 QoS 要求。参考文献[43]基于参考文献[42]中的最优功率分配策略, 提出了全双工中继网络中用户信息传输和能量传输之间的最佳时间分配策略。参考文献[44]考虑了用户的 QoS 要求, 提出 D2D 全双工中继节点部分功率用于蜂窝用户中继传输, 部分用于自身数据传输的最优功率分配策略。参考文献[45]提出了一种基于全双工 D2D 辅助协同的非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)方案, 其中弱 NOMA 用户在具有全双工 D2D 通信能力的强 NOMA 用户的帮助下改善中断性能。但这些文献仅考虑了网络中单个 D2D 全双工中继用户的场景。参考文献[46]针对网络中存在多组全双工中继辅助的 D2D 用户

组, 提出了基于线性松弛算法的系统吞吐量最大化解决方案。在参考文献[47]中, 针对网络中全双工 D2D 中继节点大规模部署的场景, 利用随机几何理论分析了网络中用户的覆盖概率性能, 分析结果显示, 当用户的目标信干噪比小于 5 dB 时, 全双工中继更加有利于提升用户的覆盖概率。此外参考文献[48]概述了在全双工异构网络中, 基于博弈论的用户资源分配策略。

4 全双工 D2D 通信未来研究方向

目前 D2D 通信的研究主要集中在半双工模式, 大量研究工作针对 D2D 通信干扰控制, 从功率控制、资源调度和 D2D 通信模式选择等各个方面提出了很多有效的协议、机制和算法。但应注意, 全双工 D2D 通信的研究还处于起步阶段, 虽有不少研究成果公开报道, 但尚未形成完整的理论和技术体系, 仍有不少关键技术亟待解决, 具体如下。

(1) D2D 混合双工通信跨层优化资源分配

在全双工 D2D 直通通信中, 对于多对 D2D 用户和多个 CU 用户共享资源的场景, 资源分配问题较为复杂, 大量研究对用户接入控制、功率控制和信道分配等多是分开进行的, 而且没有考虑用户的双工模式选择问题, 这样容易造成设计冗余。因此一个整体性的跨层设计方案, 联合优化用户双工模式选择、接入控制、功率分配和信道分配值得进一步研究。

(2) 全双工 D2D 通信中继激励机制

通过全双工 D2D 中继通信, 基站到小区边缘用户的传输链路长度大大缩短, 从而提升传输速率。然而小区边缘用户传输速率的增加是以牺牲 D2D 中继用户的功率或时间等资源为代价的。在实际系统中, 由于用户的电池容量有限, 而且在全双工 D2D 中继通信中, 用户因自干扰消除, 需要消耗更多的能量。而且现有文献大部分都假设 D2D 用户愿意为其他用户服务。因此, 如何设计



合理的用户激励机制来驱动 D2D 用户来充当其他用户的中继, 并实现双方的合作需要进一步研究。

(3) 全双工 D2D 通信中频谱效率与能量效率的折中优化机制

目前, 在全双工 D2D 通信无线资源分配的优化设计中, 研究者往往固定地以能量效率最优或频谱效率最优的方式对系统进行配置, 而没有考虑业务需求动态变化的影响, 得到的算法或机制无法在动态业务条件下保证系统性能。例如, 在全双工 D2D 直通通信中, 当用户的传输速率要求不高时, D2D 用户可以工作在半双工模式来满足用户需求, 以降低系统能耗。在全双工模式下, 用户由于要进行自干扰消除, 需要消耗更多的能量。如果一味地追求频谱效率, 用户的能量效率就可能受到损失。因此, 如何根据业务动态的特点, 研究全双工 D2D 通信中的能效与谱效的折中优化模型, 对系统进行动态优化配置, 也有待进一步深入研究。

(4) 多小区环境下的全双工 D2D 通信资源分配

目前研究多集中在单小区环境下全双工 D2D 通信的资源分配问题。在多小区环境下, 用户的资源分配变得更加复杂。因此, 需建立理论模型, 针对多小区异构网络场景, 设计更适合于实际系统的算法。

(5) 多天线环境下的全双工 D2D 干扰协调和资源分配

目前的研究大部分只考虑了基站和用户单根天线时的干扰协调和资源分配, 未来的研究应着重设计联合空域、时域、频域和码域资源的优化分配方案, 以提升系统性能。

(6) 非授权频段全双工 D2D 通信资源分配

非授权频谱是开放性的资源, 允许任何无线接入技术使用; 而 D2D 通信用户通信距离短, 发射功率小, 从而干扰也少, 因此易与其他部署在免授权频段的无线接入系统 (如 Wi-Fi 系统) 公平共存。目前全双工 D2D 通信的研究主要集中在

授权频段上, 而非授权频段的研究主要集中在 MAC 层机制, 因此关于非授权频段的全双工 D2D 通信的资源分配需要进一步研究。

(7) 全双工 D2D 通信的安全机制

基于全双工 D2D 中继通信, 小区边缘或者处于深度衰落状态的用户可以通过周围用户的中继接入网络, 从而提升用户服务体验。然而通过中继传输, 源节点发送的信息要交付给中继节点, 面临信息泄露风险。特别是当中继节点不可信时, 信息安全问题更加突出。目前全双工 D2D 中继通信中关于如何确保用户数据安全的研究较少, 值得进一步研究。

5 结束语

全双工 D2D 通信技术可以为用户提供高速率、低功耗、低时延的近距离通信服务, 提高系统频谱效率和能量效率, 减轻基站的负载, 降低运营商的运行成本, 对于实现 5G 系统具有重要意义。然而全双工 D2D 通信也给蜂窝系统带来了更复杂的电磁环境, 增加了网络资源管理优化的难度。本文综述了全双工 D2D 通信资源分配方面的研究现状和存在问题, 同时探讨了全双工 D2D 通信的未来研究方向, 相信随着 5G 标准化进程的加快, 全双工 D2D 通信的研究将更加深入并在不久的将来成为现实。

参考文献:

- [1] International Telecommunications Union. Global ICT developments, 2001-2017[EB].
- [2] 工业和信息化部. 2017 年通信业统计公报[EB]. 2018. Ministry of Industry and Information Technology. 2017 communications statistics official report[EB]. 2015.
- [3] WANG T, LI G, DING J, et al. 5G Spectrum: is china ready?[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(7): 58-65.
- [4] 方箭, 李景春, 黄标, 等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 111-118. FANG J, LI J C, HUANG B, et al. Review and prospect on the research of 5G spectrum[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 111-118.

- [5] FENG D Q, JIANG C Z, LIM G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1):167-178.
- [6] 冯大权.D2D 通信无线资源分配研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
FENG D Q. Research on wireless resource allocation in D2D communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [7] 方箭, 王坦, 黄标. 高频段宽带无线通信前瞻[J]. *电信科学*, 2014, 30(3): 109-113.
FANG J, WANG T, HUANG B. Outlook of broadband wireless communications at high frequency bands[J]. *Telecommunications Science*, 2014, 30(3): 109-113.
- [8] HWANG I, SONG B, SOLIMAN S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6):20-27.
- [9] MUSTAFA H, IMRAN M, SHAKIR M, et al. Separation framework: an enabler for cooperative and D2D communication for future 5G networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 419-445.
- [10] 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.
- [11] 焦岩, 高月红, 杨鸿文, 等. D2D 技术研究现状及发展前景[J]. *电信工程技术与标准化*, 2014, 27(6):83-87.
JIAO Y, GAO Y H, YANG H W, et al. Research situation and development prospect of D2D[J]. *Telecom Engineering Techniques and Standardization*, 2014, 27(6):83-87.
- [12] 李建业, 焦秉立. 一种适用于同频同时隙双工的干扰消除方法: CN101141235[P]. 2008-03-12.
LI J Y, JIAO B L. An interference cancellation method for simultaneous frequency duplex operation:CN101141235[P]. 2008-03-12.
- [13] 李建东, 刘磊, 盛敏, 等. 面向 5G 无线网络的智能干扰管理技术[J]. *电信科学*, 2016, 32(6):3-14.
LI J D, LIU L, SHENG M, et al. Intelligent interference management in 5G wireless networks[J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(6):3-14.
- [14] 唐有喜. 同时同频全双工原理与应用[M]. 北京: 中国科学出版社, 2016.
TANG Y X. Full duplex principles and applications[M]. Beijing: Chinese Science Press, 2016.
- [15] 张丹丹, 王兴, 张中山. 全双工通信关键技术研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(8): 951-964.
ZHANG D D, WANG X, ZHANG Z S. Research on the key technology of full duplex communication[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2014, 44(8): 951-964.
- [16] KLUMPERINK D. Full-duplex radios for local access[EB]. 2015.
- [17] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(5): 551-563.
- [18] YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The development trend of 5G mobile communications and key technologies[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2014, 44(5): 551-563.
- [19] SONG L, WICHMAN R, LI Y, et al. Full-duplex communications and networks[M]. Cambridge: University Press, 2017.
- [20] WANG L, TIAN F, SVENSSON T, et al. Exploiting full duplex for device-to-device communications in heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 146-152.
- [21] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications in cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(4): 49-55.
- [22] JANIS P, YUC-H, DOPPLER K, et al. Device-to-device communication underlying cellular communications systems[J]. *International Journal of Communications Network & System Sciences*, 2009, 2(3):169-178.
- [23] JANIS P, KOIVUNEN V, RIBERIRO C, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlying cellular networks[C]//*IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, April 26-29, 2009, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [24] ZULHASNINE M, HUANG C C, SRINIVASAN A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]//*IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, Oct 25-29, 2010, Niagara Falls, NU, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2010: 368-375.
- [25] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [26] CHEN T, CHARBIT G, SHAKOL A. Time hopping for device-to-device communication in LTE cellular system[C]//*2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, April 18-21, 2010, Sydney, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [27] ZHANG H, MA L, SONG L, et al. Wireless device-to-device hypergraph optimization[C]//*2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, April 27-May 2, 2014, Toronto, ON, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2014: 185-186.
- [28] ZHANG L, CHENG L, YANG L, et al. Interference graph based resource allocation (InGRA) for D2D communications underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 52(13):1-7.
- [29] WANG L, WU L. Fast pairing of device-to-device link underlay for spectrum sharing with cellular users[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(10): 1803-1806.
- [30] MIN H, LEE J, PARK S, et al. Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(12):3995-4000.



- [30] BAO P, YU G. An interference management strategy for device-to-device underlaying cellular networks with partial location information[C]//IEEE, International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Sept 9-12, 2012, Sydney, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2012: 465-470.
- [31] WANG H, CHU X. Distance-constrained resource-sharing criteria for device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9): 528-530.
- [32] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction[C]//IEEE International Conference on Information, June 20-22, 2016, Ottawa, ON, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2012: 445-449.
- [33] XU C, SONG L, HAN Z, et al. Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: a reverse iterative combinatorial auction based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 348-358.
- [34] WANG Q, WANG W, JIN S, et al. Quality-optimized joint source selection and power control for wireless multimedia D2D communication using Stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2014, 52(14):1-14.
- [35] FENG D Q, YU G D, YI Y W, et al. Modeswitching for device-to-device communications in cellular networks[C]//2014 IEEE Global Conf on Signal and Inform Process (GlobalSIP'14), Dec3-5, 2014, Atlanta, GA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1291-1295.
- [36] FENG D Q, YU G D, XIONG C, et al. Mode switching for energy-efficient device-to-device communications in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5260-5271.
- [37] CHENG W, ZHANG X, ZHANG H. Optimal power allocation for full-duplex D2D communications over wireless cellular networks[C]//IEEE Global Communications, Dec 8-12, 2014, Austin, TX, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 4764-4769.
- [38] CHENG W, ZHANG X, ZHANG H. Heterogeneous statistical QoS provisioning for full-duplex D2D communications over 5G wireless networks[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [39] YANG T, ZHANG R, CHENG X, et al. Graph coloring based resource sharing (GCRS) scheme for D2D communications underlaying full-duplex cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2017, 66(8): 7506-7517.
- [40] ALI K S, ELSAWY H, ALOUINI M S. Modeling cellular networks with full-duplex D2D communication: a stochastic geometry approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(10): 4409-4424.
- [41] CHAI X, LIU T, XING C, et al. Throughput improvement in cellular networks via full-duplex based device-to-device communications[J]. IEEE Access, 2016(4): 7645-7657.
- [42] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Hybrid full-duplex/ half-duplex relaying with transmit power adaptation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(9): 3074-3085.
- [43] ZHONG C, HASURAWEEER A, ZHENG G, et al. Wireless information and power transfer with full duplex relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3447-3461.
- [44] ZHANG G, YANG K, LIU P, et al. Power allocation for full-duplex relaying-based D2D communication underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2015, 64(10): 4911-4916.
- [45] ZHANG Z, MA Z, XIAO M, et al. Full-duplex device-to-device aided cooperative non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2017, 66(5): 4467-4471.
- [46] DANG S, COON J, CHEN G. Resource allocation for full-duplex relay-assisted device-to-device multicarrier systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(2): 166-169.
- [47] ZHONG B, ZHANG J, ZENG Q, et al. Coverage probability analysis for full-duplex relay aided device-to-device communications networks[J]. China Communications, 2016, 13(11): 60-67.
- [48] SONG L, LI Y, HAN Z. Game-theoretic resource allocation for full-duplex communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(3):50-56.

[作者简介]



丁家昕（1975-），男，博士，国家无线电监测中心高级工程师，主要研究方向为频谱工程、频谱管理等。

冯大权（1986-），男，博士，深圳大学助理教授，主要研究方向为 D2D 通信、车联网、IoT 等。

钱恭斌（1967-），男，博士，深圳大学副教授，主要研究方向为移动通信技术、通信与电子系统的设计与实现、DSP 应用系统的设计与实现、非线性系统与混沌保密通信等。

张楠（1993-），女，深圳大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为全双工 D2D 通信。