

## 面向 5G 通信网的 D2D 技术综述

钱志鸿, 王雪

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 在探讨 D2D 对通信技术未来发展的导向作用基础上, 明确了影响 D2D 系统设计的多个因素, 即 D2D 设备发现、资源分配、缓存技术、D2D-MIMO。从而勾画出基于 D2D 技术的光纤前传和软件定义网络实现数据/控制分离的扁平化 5G 架构, 提出负责接入的下层宏/小基站蜂窝网和负责管理的上层网络云的管理机制。将 D2D 技术、SDN 技术、边缘计算和物联网技术等关键技术引入未来移动通信网络已经成为研究领域的热点, 针对与之相关的、未来大规模网络的移动性、QoS 和大数据特性进行了讨论。

**关键词:** D2D; 5G; 物联网; 边缘计算; MIMO

**中图分类号:** TN925

**文献标识码:** A

## Reviews of D2D technology for 5G communication networks

QIAN Zhi-hong, WANG Xue

(School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** On the basis of exploring D2D's leading role to developing trend of communication technologies in the future, some issues in terms of D2D system design are illustrated, like D2D device discovery, resource allocation, caching technology and D2D-MIMO. Thereupon, the outline of separate data/control flattening 5G framework based on D2D is drawn, on the basis of optical fiber fronthaul and software defined network techniques. The mechanism, the lower macro/small base stations for access whereas the upper network cloud for management, is proposed. What emerges is that still major issues shall be faced by the research community, as D2D, SDN, edge computing and IOT technologies are expected to be introduced into the future mobile communication networks. The most relevant techniques for the future large-scale networks, such as mobility, QoS and big data behavior, are addressed in details.

**Key words:** D2D, 5G, IoT, edge computing, MIMO

### 1 引言

D2D (device to device)<sup>[1,2]</sup>技术是指通信网络中近邻设备之间直接交换信息的技术。通信系统或网络中, 一旦 D2D 通信链路建立起来, 传输数据就无需核心设备或中间设备的干预, 这样可降低通信系统核心网络的数据压力, 大大提升频谱利用率和吞吐量, 扩大网络容量, 保证通信网络能更为灵活、智能、高效地运行, 为大规模网络的零延迟通信、移动终端的海量接入及大数据传输开辟了新的途径。目前, 标准化组织 3GPP 已经把 D2D 技术列

入新一代移动通信系统的发展框架中<sup>[3~5]</sup>, 成为第五代移动通信<sup>[6]</sup>(5G, 5-generation)的关键技术之一。

近年来, 爆炸式增长的智能设备与紧缺的频谱资源矛盾日现, 国内外很多学者试图通过频谱资源再分配等方法解决这个矛盾, 而事实上很难实现。2015 年 3 月, 李克强总理在政府工作报告中首次提出“互联网+”行动计划, 以推动移动互联网、云计算、大数据、物联网 (IoT, Internet of things)<sup>[7,8]</sup>等与现代制造业结合。同年 5 月, 国务院发布了和德国工业 4.0 同样壮观的“中国制造 2025”计划。这意味着新兴的通信技术和网络技术将渗透到工

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61371092, No.61401175); 教育部博士点基金资助项目 (No. 20130061120062)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(No. 61371092, No.61401175), Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 20130061120062)

业、农业、军事、交通、医疗和城市建设的各个方面,将形成一个智能化、个性化、大规模的通信网,将产生智慧城市 D2D、智能家居 D2D、车载 D2D 和可穿戴设备 D2D。即利用下一代移动通信技术、物联网技术和 D2D 技术,实现物理层面和网络层面的近距离、大规模通信。反之,离开上述新兴技术,“中国制造 2025”将没有内涵。

未来无线通信网络将混合多种网络形式,为用户提供大规模、多接入的数据密集型服务<sup>[9]</sup>。据思科公司预测,2019 年全球移动数据流量将是 2014 年的 10 倍,接入 IP 网络设备的数量将达到百亿级别<sup>[10]</sup>。根据市场调研机构 Juniper Research 发布的数据,到 2020 年,预计全球 90%以上的人将主要使用移动设备来获取数字媒体信息,物联网连接设备数量将达到 385 亿,这一趋势或许会进一步延续到 2030 年,将有万亿台设备接入网络。在未来的 20 年之内,由于超高清流媒体视频、基于云的应用逐渐“爆发”以及各类移动智能终端设备市场普及率的不断提高,移动通信网络所承载的数据流量将会增长 10 000 倍。爆炸性增长的移动数据流量、海量终端设备的接入以及不断涌现的新兴业务对现有通信网络的体系和架构带来了巨大的挑战。为应对网络密集化和差异化带来的高速流量增长和海量设备接入,不能指望任何网络或通信系统的中心设备能够大范围、高效率地指挥、调度通信网络中各终端节点的行为,在无需中心设备干预的情况下,大批量的“本地”链接对未来网络是势在必行的。由此可见,D2D 的研究工作将成为国内外的研究热点。

从通信网络整体结构看,D2D 通信可以分为基于互联网的 D2D 连接和基于移动通信技术的 D2D 连接。抛开网络的整体而孤立地谈 D2D 是没有意义的。基于互联网的 D2D 连接,网络架构相对比较简单,但在新的短距离通信技术诞生之前,依靠现有的 Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee 技术,无法承载大规模的 D2D 连接,况且,抛开移动通信庞大的基础设施、科研群体及长期积累的理论、应用方面的研究成果,搭建相对独立或仅依赖于互联网的 D2D 通信系统,大规模接入时,系统性能无法保证,拓展空间有限;而基于移动通信技术的 D2D 连接,相对比较复杂,其研发过程与 5G 移动通信技术是绑定的。国内外相关组织先后启动了 5G、后 5G 的研究,如我国的 IMT-2020 推进组<sup>[11]</sup>、欧盟的 5G PPP

(5G public private partnership)等,计划 2020 年运营。届时,基于 5G 的 D2D 将充分利用新一代移动通信技术的前所未有的超大带宽、超高数据传输速率、大规模接入能力和大数据处理能力,彰显其优势,这是基于互联网的 D2D 连接无法比拟的。这意味着 2020 年产生的移动通信网是一个超大规模的网络,是一个空前复杂的网络,是一个真正意义上的异构网络。对此,研究者们引入网络功能虚拟化<sup>[12]</sup>、数据面与控制面分离<sup>[13]</sup>等思想,将网络功能虚拟化(NFV, network function virtualization)、软件定义网络(SDN, software defined network)<sup>[14]</sup>、边缘计算(edge computing)<sup>[15]</sup>、窄带物联网(NB-IoT, narrow band internet of things)和 D2D 通信等作为 5G 的关键技术,充分利用和发挥网络虚拟化功能,提升网络整体的承载和计算能力,简化网络管理,实现网络终端设备的大规模接入。

## 2 D2D 通信中的关键技术

D2D 通信的基本原理模型<sup>[16]</sup>如图 1 所示,在 D2D 通信模式下,近邻用户设备(UE, user equipment)不再通过基站(BS, base station)中继通信,而直接进行 UE 间的连接与通信。在异构网络中,将同时存在传统的 UE-BS 连接与 D2D 连接,同时涵盖本地广播通信、车联网等领域,此外,D2D 通信还包括 D2D 本地网(D2D-LAN)<sup>[17]</sup>,由此可见,D2D 涵盖范围十分广泛,所涉及到的科学技术问题也繁杂多样,其中的关键科技问题包括 D2D 设备发现、资源分配、D2D 缓存网络、边缘计算和 D2D-MIMO 等多种通信网络与通信过程。本文将根据 D2D 发现需求与研究现状,将主要关键技术归纳为 D2D 设备发现与会话建立、资源分配与干扰管理、D2D 缓存网络、D2D-MIMO 这 4 类,进行技术原理与发展现状的综述,在此基础上对 D2D 未来的发展进行设想与规划,着重探讨 D2D 与 5G、物联网、SDN 的技术结合与关键技术。

### 2.1 D2D 设备发现与链路性能

D2D 通信中,设备间如何发现彼此并发起 D2D 连接,是异构网络各类同质或异质 D2D 通信的基础。根据现有研究成果,本文把研究点大体分为设备发现和链路性能 2 个方面。

#### 1) 设备发现与会话建立

在 D2D 设备发现的研究方案中,可以把用户权限分为 2 类:限制发现与公开发现<sup>[18]</sup>。对于限制

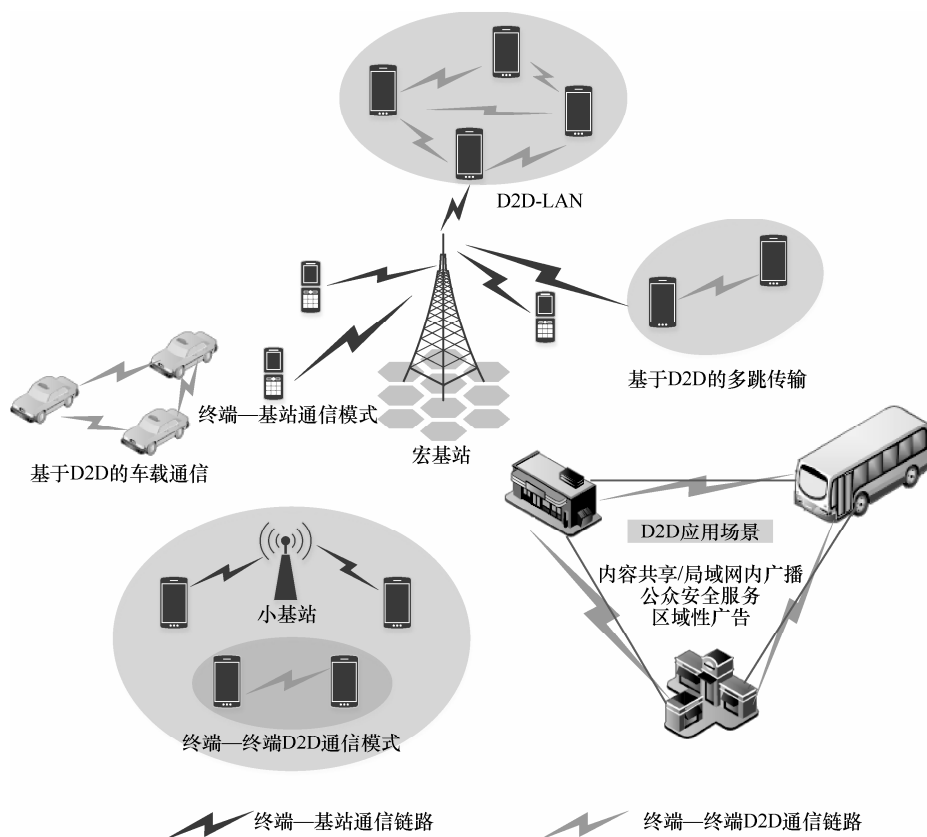


图1 异构网络中的 D2D 通信模型

发现，UE 在没有明确许可的情况下是不允许被检测到的，用户禁止与陌生设备进行通信连接，以此来保证 UE 的隐私性与安全性。而对于公开发现，只要当前 UE 是另一个设备的近邻设备，则可能被检测到，进而建立连接，相较于限制发现模式而言，这种模式用户隐私性较差，但是连接复杂度更低。上述 2 种方式各有其适应环境，前者适用于网络环境较好、选择较多的情况，因此隐私性则是较为重要的问题；而后者则适用于救援与应急通信，比如主网络覆盖不畅等情况，此时连接更为重要。从网络的角度来说，设备发现可以采用基站紧控制和松控制<sup>[19,20]</sup>模式。在紧 BS 控制下，BS 首先令要进行近邻服务的用户发送发现信号，比如同步信息、定义以及需要的服务信息，然后指定目标用户附近的用户接收发现信号，这样用户发现过程既快速又精准。与此同时，BS 也将产生信号开销。在松 BS 控制下，BS 只是周期地广播用于传输的信源消息设备，并接收相应的发现信号。要建立 D2D 连接的用户可以发送或接收发现帧。该种方式只需要低的信令开销，但是对于用户而言，因为 UE 需要等待发现资源来发送发现帧，以及 UE 设备的响应帧，

因此，效率也要低于紧 BS 控制模式。

在设备发现方面，如何发现 D2D 设备中的针对性应用也是研究内容之一。文献[21]提出了一种基于编码的蜂窝 D2D 通信发现协议，为了实现近邻服务，比如社交网络与移动营销，设备需要发现包含目标应用的近邻设备，文献[21]利用包含设备移动应用的压缩信息发现短码实现设备发现。发现码由散列函数或者 Bloom 滤波器产生，当设备接收到来自另一个设备的发现码时，该设备可以近似发现另一个设备中的移动应用。运行此协议，可以快速发现大量设备，同时兼顾少量视频资源。

当设备完成发现过程以后，D2D 设备之间将建立连接。对此，文献[22]中提出了 2 种方法，即基于 IP 检测的方法和 D2D 专用信令方法。前者把 2 个 D2D 设备间的通信标注为潜在 D2D 通信。如果 D2D 链路满足更高的能量有效性以及更低电量的标准，BS 就建立一个 D2D 承载。在这种方式下，BS 控制并处理整个过程，D2D 传输的建立过程对用户是透明的，因此，基于 IP 的监测机制对 BS 维持 D2D 连接并提供服务的连续性是有益的。而对于后者（D2D 专用信令模式），潜在 D2D 用户开发

专用的系统结构演变信令 SAE, 用来建立 D2D 连接。此外, 文献[22]定义了一种专用的地址格式, 用来分离 D2D 传输的初始协议请求 SIP, 以及常规 SIP 请求。一旦专用 D2D 地址格式被检测到, D2D 承载则可建立, 而非常规 SAE 承载。利用专用信令, D2D 传输建立过程速度快, 并且可实现 BS 低处理负载。然而, 上述处理过程对用户并不是透明的, 因为用户需要区分 D2D 通信和常规蜂窝通信。此外, 对用户来说, 当 D2D 直连并不可行时, 切换到常规 BS 中继传输也很困难。

当前关于 D2D 设备发现与会话建立的研究工作主要集中在单蜂窝场景, 相邻的双蜂窝以及多蜂窝情形下, 将节约更多的网络资源, 尤其是当两用户/多用户位于各自所在蜂窝的边缘时, D2D 通信的必要性与优越性则更加显著, 然而设备发现过程将会更加复杂, 不仅需要单蜂窝情景下的发现与会话过程, 还涉及到 BS 间的协调过程, 因此双蜂窝/多蜂窝的设备发现方案仍需要进一步研究。文献[23]提出了 2 种能量节约的下行链路传输, 限制 D2D 簇能量消耗, 将峰值噪声比作为视频质量传输标准, 同时基于联合博弈论与松弛因子提出了基于分布式合并分裂算法 D2D 簇状接入与缓存, 从节约 BS 与所有用户能量的角度保证了 D2D 分簇与缓存接入的有效性。基于近邻性与能量有效性而建立和选择的 D2D 连接也是有效的研究方案<sup>[24]</sup>。文献[25]提出了一种基于真实双向拍卖模型的多蜂窝 D2D 竞争接入算法 TAD, 其中具备 D2D 通信能力的蜂窝用户作为卖方, 而其他等待接入用户作为买方。同时考虑蜂窝内与蜂窝间接入, 以获得高拍卖有效性。经过细致有效的买卖匹配、胜利者决策以及定价过程, TAD 保证个体合理性、预算均衡以及真实性。该方案可以扩展到买卖双方具有多重资源的情况。但综合而言, 此类研究尚少, 尤其是所提方案或从用户角度, 或从网络的角度为决策, 而同时考虑二者需求的方案仍没有足够的成果, 而如何在兼顾两者的基础上, 建立满足 QoS 需求、快速、低耗的 D2D 设备发现与会话过程也是未来发展的需要。

## 2) 链路性能

当 D2D 通信建立后, D2D 连接的性能将关系到整个网络, 因此 D2D 连接的性能研究也是当前的研究热点。文献[26]利用随机几何来探讨 D2D 通信在平均用户率上的增强条件, 对于实际的高负荷网络, 给出了以最大 D2D 连接距离, 或者用户密

度参量为变量的函数闭合表达式与条件边界的闭合表达式, 以此表征 D2D 通信的优势范围。研究表明, 在适宜调度策略的基础上, D2D 通信不仅可以在一般性公认的近距离通信中具有优势, 在 D2D 链路距离与蜂窝接入点距离接近, 以及较大用户密度的情形下, 都具有优越性。当潜在共用信道 D2D 设备对 (D2D pair) 确定后, 所有可行链路的传输顺序也将影响到系统性能<sup>[27]</sup>, 这是一个完全 NP 问题, 文献[27]利用图论进行分析, 得出传输顺序优化问题等同于限制均衡最小割图分割问题的结论, 并在此基础上提出了分布与集中式的有效异步簇算法。文献[28]提出一种功率传输模型与信号模型来实现无线能量收集与安全信息的传输, 以此来提升 D2D 传输的安全性。文献[29]研究了三时隙两路放大转发中继下的 D2D 用户协助下的通信中断概率, 并通过最佳功率分配方法最小化中断概率。文献[30]在随机到达通信量与时变信道条件下, 将 D2D 传输能量有效性与时延的折中建模为随机优化问题, 同时考虑了平均功率、干扰控制与网络稳定性的限制。利用分式规划与 Lyapunov 优化方法, 基于棱柱分支定界法寻求该非凸与 NP 难问题的折中解。文献[31]分析了 D2D 通信跳数与中断概率的关系, 并给出闭合表达式, 研究表明, D2D 通信可大幅减少蜂窝间通信中断概率, 同时 D2D 通信的中断概率小于 5%, 表明了其可靠性。文献[32]提出一种基于多跳中继的 D2D 协作转发算法, 包括多播和单播 2 个模式。该算法根据 D2D 链路质量自适应地选择最优的中继、路由及传输跳数, 能够充分利用 D2D 链路的多信道分集增益。在上述对 D2D 传输选择与性能的研究中, 都不可避免地涉及到信道状态信息 CSI<sup>[33]</sup>, 如何获取该信息, 以及信息的获取准确度都是关系到 D2D 传输性能的关键因素, 同样具有重要的研究价值。

## 2.2 D2D 资源分配

D2D 为通信提供了更方便、灵活的传输模式, 而如何合理并充分利用传统蜂窝资源与 D2D 资源, 以及有效分配频谱、功率等资源, 对于 D2D 通信至关重要。一方面, D2D 通信为用户带来了更多的自由度, 既可以利用专用的资源, 也可以复用 BS 中继链路, 节约能量, 复用频谱资源, 通信方式更多样, 资源利用率更高。另一方面, D2D 通信与传统通信方式并存的局面也将带来 D2D 用户与传统的蜂窝用户间的干扰, 其中包括蜂窝内干扰与蜂窝

间干扰。因此，如何充分合理地在 D2D 与传统方式间进行灵活切换，提升通信的 QoS，合理分配系统资源，避免用户间干扰，是 D2D 通信资源分配技术所需要解决的重点问题，而干扰管理的有效性也关系到 D2D 技术优势的显现与利用，具有重要意义。本文将资源分配的研究分为 2 类，一类为面向干扰管理的资源分配研究，另一类为面向传输 QoS 的资源分配研究。

### 1) 干扰管理

在 D2D 通信资源分配与干扰分析方面，国内外已有较多的研究方案。功率控制是一种直接限制干扰的方案，当一个信道同时被多个用户复用时，由于链路之间的相互干扰，通过功率控制来最大化通信速率将成为一个非凸问题。该问题的求解至今仍是一个开放性问题，文献[34]将该问题建模为一个简洁的二值整数规划问题，然而整数规划仍是 NP 难问题，该文进一步利用 Canonical 对偶理论，得到其对偶形式，该对偶问题是一个连续域内的凸问题，在特定的条件下，可以通过求解对偶问题得到原问题的最优解。文献[35]提出了基于全网吞吐量的优化功率控制与模式转换方法，以此进行干扰管理；文献[36]提出一种固定功率边缘策略来协调 D2D 与传统蜂窝用户（RCU, regular cellular user）的干扰，D2D 设备通过识别功率边缘范围，并调整自身传输功率来满足最小信干比 SINR 需求。该方式实现简单，但是很难确定适宜的功率边缘，高的边缘值将会减少与 D2D 共享资源的传统蜂窝用户数量，而低的边缘值又会降低 D2D 用户满足最小 SINR 的概率。JPRBA 算法<sup>[37]</sup>区分了多用户 D2D 下行 LTE-A 网络的多蜂窝内与蜂窝间干扰管理问题，通过为每个 D2D 发送机引入功率控制与资源分配向量，该向量为每条 D2D 链路选择合适的复用资源块。为了获得合适的向量值，该算法引入了组稀疏结构来决策和值率最大化问题。文献[38]基于整个网络的性能，构建了最小化网络设备总传输功率的强制性优化方案，在保证 D2D 与蜂窝用户 QoS 需求的同时，将相互间干扰控制到某一范围内。基于粒子群优化的功率分配方案也在 D2D 通信中实现<sup>[39]</sup>。在基于 D2D 的 LET 网络中，干扰管理还需解决时间与频率同步问题，以避免蜂窝内与蜂窝间的干扰<sup>[40]</sup>。在车联网中，利用功率控制避免干扰也是较为常见的解决方案，文献[41]利用车辆地理位置，对 D2D-Vehicular 进行分组，稀疏化潜在的

D2D-Vehicular 链路，通过利用复用信道选择与功率控制，减少车辆间的相互干扰。

### 2) QoS 保证策略

D2D 资源配置技术不仅可以针对设备间干扰进行管理，更为重要的是针对全网性能进行优化，一方面可以满足某些特性需求下的通信性能，另一方面，通过合理的资源配置，达到全面提升网络 QoS 的目的。通过分析网络在不同信道模式下（共享信道、正交信道）的时延 QoS 需求与影响，进而提出针对性的功率分配方案，在统计 QoS 需求的基础上，可实现在给定时延 QoS 限制下获得最大网络吞吐量的目的<sup>[42]</sup>。文献[43]提出了 D2D 通信限制区域和 D2D 用户限制复用蜂窝用户资源区域的概念，为了保证蜂窝系统服务质量需求并提升系统性能，使用非线性规划问题中的乘子法来确定 D2D 用户和 CUE 的最佳发射功率，以最大化系统吞吐量。JPAMS<sup>[44]</sup>推导了满足不同 QoS 限制需求的 D2D 与蜂窝链路最小功率，并基于功率配置在非理想 CSI 的情况下进行模式选择。文献[45]提出改进的比例公平(IPF)干扰控制方案，在保证蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量需求的前提下，为每一个 D2D 设备对选择最佳的蜂窝用户来共享频谱资源，IPF 方案比起之前的方案，能够有效改善蜂窝系统的公平性和吞吐量。在基于 D2D 的蜂窝网异构应用中，可以根据应用的 QoS 需求进行资源与功率分配。文献[46]分析了数据流类与文件共享 2 种不同的应用类型，并提出优化方案协调 D2D 与蜂窝通信共享资源，该方案可进一步扩展到多种不同应用类型的情形。基于资源配置亦可实现安全性需求，文献[47]提出了基于人工噪声辅助的 D2D 异构蜂窝安全通信方法，建立系统可达保密速率模型，然后在基站的蜂窝通信信号中添加人工噪声，以最大化系统保密速率为目标设计蜂窝用户期望信号与人工噪声的波束矢量，进而基于公平性约束提出一种基站功率分配、期望信号预编码向量以及 D2D 功率控制的联合优化算法，系统可达保密速率最高提升约 2.7 bit/(s·Hz)。

### 3) 模式切换与分流机制

将不同的无线技术融入到现有移动网络中，充分利用未使用的带宽，将计划通过蜂窝网络传输的数据转移到其他无线网络中，缓解蜂窝网压力，是分流(offloading)的思想来源。在 D2D 网络中，同时存在 D2D 通信与传统蜂窝通信 2 种模式，它

们之间互相协调,同时又互相竞争与干扰,因此,如何在二者之间适宜切换,将通信数据进行有效合理分流,进而最小化干扰,最大化系统性能,是 D2D 通信以及基于该技术的多种网络所需协调问题。近年来,分流问题引起了工业和学术界的广泛研究与探讨,相关学者致力于从不同角度寻找解决分流的有效方法。研究初期,许多学者尝试用移动代理或增加转发节点的方法提高 D2D 分流的潜在机会<sup>[48,49]</sup>,代理节点从蜂窝基站获取多媒体内容,由 Wi-Fi 多播转发给其他感兴趣的节点,利用社交网络分析终端用户之间的接触模式,进而选择合适的转发节点集。Valerio 等更直接地在分流中借助机会网络<sup>[50]</sup>,将要转发的内容副本注入到机会网络中,以确保数据能够及时有效地到达用户端。这类研究的实质是通过用户的移动重复性和流动周期性扩大 D2D 建立范围,能有效增加当前网络分流机会,但却很难满足未来网络超低时延的需要。

随着研究工作的深入,也有部分学者从全局角度考虑 D2D 分流的设备发现和连接建立等问题,出现了面向全局、局部和无网络覆盖的统一设备发现方案<sup>[51]</sup>。还有一些研究成果利用分流所带来的网络性能增益,进一步优化分流策略的实现细节<sup>[52]</sup>。时隙调度算法<sup>[53]</sup>可在时隙上调度相同频率资源上的 D2D 链路,如此则可获得相同频率 D2D 链路的时隙比例公平性。文献[54]提出了最大化 D2D 中继系统和率的随机优化算法,满足每个 UE 的最小化平均数据率需求,进而提出了机会调度算法与低复杂度的启发式算法。文献[55]提出了最大化用户优化比例公平调度算法,文献[56]利用博弈论解决 D2D 与蜂窝网信道竞争问题,文献[57]针对大规模用户的基站调度,将该问题规划为流极大值问题。文献[58]以最大化全局能量有效性为目的,同时考虑电路功率消耗与所有用户的 QoS 需求,考虑了 3 种传输模式,即专用模式、复用模式与蜂窝模式,进而采取参数 Dinkelbach 方法与凹凸过程,通过连续凸近似将传统优化方法转化为更易管理的模式,最后利用内点法求解。文献[59]考虑到用户的自私性,提出了交联博弈算法来获取自私行为的动态参数,进而提出了用户效用函数并指明了稳定网络的收敛条件。基于此,构建了用户可以基于历史记录确定 D2D 分享策略的交联算法。文献[60]提出了一种 D2D 通信的混合模式,D2D 链路可以工作在多

模式复用的条件下,在最大化加权 D2D 和率的前提下,根据非凸蜂窝功率限制与信道分配的二进制限制,提出了一种基于能量分裂变量的二步接入策略,由此混合模式分配与资源配置可以分别优化。当前的研究作为蜂窝网分流调度策略的研究奠定了一定的理论基础,但多数研究建立在理想的网络环境和预期分布下,没有考虑未来移动网络的异构性、业务多样性以及用户面的超低时延体验等需求,未来的研究需要通过基于不同业务的蜂窝网络能效模型将 D2D 分流网络与蜂窝网络紧密耦合,设计全局统一的网络控制机制辅助 D2D 网络调度策略的执行,解决 D2D 通信的近邻发现和资源分配等诸多难题,最终为未来移动网络提供完善灵活的 D2D 分流体系。

### 2.3 D2D 缓存网络

无线网络数据急剧增加,为了满足未来通信高速率、低时延的数据传输需求,尤其是视频流接入增加了无线网络的需求与考验,缓存技术则是解决该问题的重要途径之一,通过专用设备存储,或者用分散在网络中的专用辅助节点进行存储。假设一个中等密度的城市地区,每个用户的视频需求可以通过本地网络缓冲得到满足,而不需要占用高吞吐量回传给核心网,这种回传是网络的一大瓶颈,将带来高成本,或者是不灵活等缺点。因此在无线 D2D 网络中,缓存技术的研究是高速率、高吞吐量业务需求所依赖的关键技术。目前,缓存技术的研究主要集中在优化算法、基于信息论的缓存研究与性能分析、移动性等方面。在优化算法方面,主要是根据缓存目标,如最小化下载时间,最大吞吐量等,在此基础上,将缓存问题建模为优化问题进行求解<sup>[61]</sup>。文献[62, 63]为基于信息论的相关研究,研究了一跳 D2D 通信网络中的用户端缓存问题,网络由  $n$  个用户节点构成,每个存储一个文件库  $m$  个文件中的  $M$  个,通过随机缓存策略与干扰避免传输,结合空间复用,则链路在空间上得以分离,因此这些链路可以同时处于激活状态,因为  $n, m \rightarrow \infty$ ,  $nM \gg m$ , 每个用户的吞吐量为  $\Theta\left(\frac{M}{m}\right)$ , 中断概率可控为小概率事件,以此保证并提升 D2D 无线网络的性能。文献[64]以一种简洁的形式提出了基于缓存的无线网络吞吐量标度律研究以及异步复用策略。在移动性方面,相关研究分别从移动性建模与移动性对缓存的影响等方面进行研究。此外,也

可以通过增加基站的缓存空间节约系统带宽，以此大幅提升系统性能<sup>[65]</sup>。

## 2.4 D2D 与 MIMO 技术

在 LTE-A 以及其他一些系统中,用户终端具有多天线, D2D 用户与传统蜂窝用户 RCU 就可以复用频资源,实现同时传输,系统的顽健性与容量都将得到增强与改善,因此,研究 D2D-MIMO 传输策略,以充分利用无线信道资源,具有广泛的研究价值。关于 D2D 与 MIMO 技术的研究,主要集中在接收机设计方面,由于多用户的增加, D2D 用户与蜂窝用户间的干扰也将随着用户数增加而变得更为复杂。D2D-MIMO 的基本结构如图 2 所示,由于多用户的存在,不同的 D2D 链路以及 D2D 与蜂窝用户通信间将存在干扰,此外,当 2 个不在同一蜂窝区域内的用户同时向某一接收 D2D 设备发送信息时,还存在碰撞等干扰问题。因此对接收机的设计研究较为重要,也吸引了国内外众多学者,产生了丰富的成果。文献[66]针对 D2D-MIMO 系统终端 D2D 用户复用蜂窝下行资源,基站对 D2D 接收机干扰较严重的问题,通过编码策略进行抑制干扰,文献[67]基于最小均方误差设计了预编码解码器,并进一步设计了分布与集中式算法,减少 D2D 与蜂窝用户双向通信干扰。大规模 MIMO 中的多用户传输也会增加蜂窝与 D2D 间的干扰,文献[68]分析了大规模 MIMO 与 D2D 网络在多蜂窝设计上的相关影响。文献[69]设计了最大化 D2D 与 RCU 传输率的接收机,利用连续二次规划来寻找最优的传输预编码与解码器。

## 3 D2D 未来技术发展

当前关于 D2D 的研究尚且集中在 D2D 的发现、建立、资源分配等基本关键问题,未来的研究将一方面着眼于进一步解决上述科学问题,尤其是涉及到移动性、多蜂窝用户等场景时的设备发现、资源分配、干扰管理与缓存;另一方面随着 5G 通信的日益临近,以及“互联网+”战略的发展,如何在 5G 通信体系与物联网系统中发挥 D2D 技术的优势,则是 D2D 未来发展与研究的趋势<sup>[70]</sup>。

### 3.1 D2D 关键技术研究发展趋势

在 D2D 无线网络中,设备发现、资源管理、缓存等关键技术问题是网络中的基本也是关键问题,已有一定的解决方案,然而无线网络纷杂多样,网络构成、拓扑、环境、需求等的变化都将对上述通信关键技术的解决方案提出新的要求,因此本文面向未来网络特性,对上述关键技术的发展做出展望。

#### 1) 多蜂窝网络下的 D2D 通信

目前的研究大都解决单一蜂窝内的用户与 D2D 设备间的连接建立、资源管理等问题,然而 D2D 通信将不仅存在于单蜂窝环境,对于一般性的蜂窝网络, D2D 是泛在存在的,尤其是当前研究大都假定 D2D 设备发现与会话建立过程已完成,因此在多蜂窝网络环境下 D2D 设备如何发现、发现设备之间是否有竞争、竞争如何协调、如何通过资源配置协调干扰以及满足此种情形下的 QoS 需求

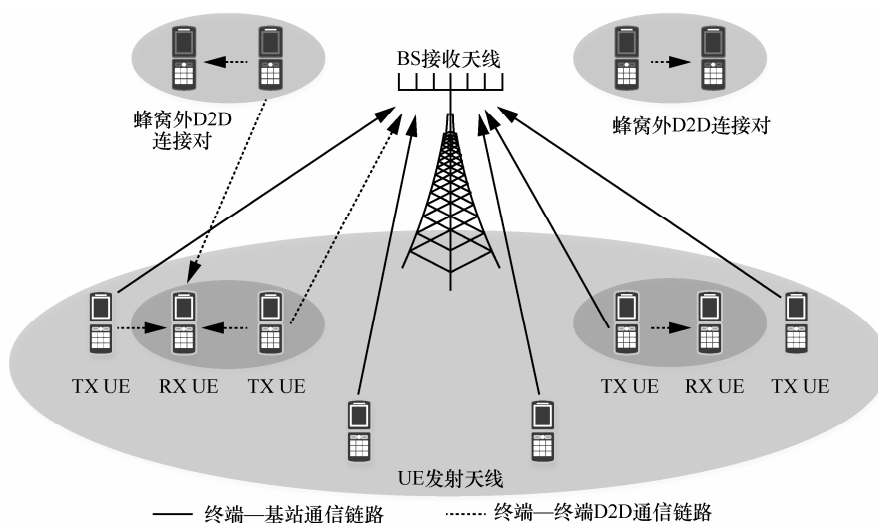


图2 D2D-MIMO 结构与原理



等, 都是未来研究需要解决的问题。

## 2) 设备移动性对 D2D 通信的影响

移动性是无线通信的基本特性, 因此 D2D 设备将不可避免地存在不同程度的移动性, 当设备移动时对 D2D 链路的建立, 以及对蜂窝用户的分流与干扰管理等策略都将产生不同程度的影响; 同时, 当前缓存技术研究大都是假定在当前蜂窝内存在辅助节点进行数据缓存, 那么移动性也将影响原方案的有效性; 此外, 移动环境下, 如何在传统通信方式与 D2D 方式间进行模式选择与数据分流也是发挥 D2D 通信优势的重要课题。因此设备移动性对上述关键技术的影响也是 D2D 无线通信技术不可忽视的问题。

## 3) QoS 需求

虽然当前研究已将无线网络的 QoS 需求列为研究目标, 然而无线网络, 尤其是在未来的异构网络环境下, QoS 的需求将更为复杂, 如何在满足当前参数需求的同时, 有效协调网络总体性能是无线网络永恒的课题。

## 4) 大规模网络的 D2D 通信

当前研究大都集中在单蜂窝单跳 D2D 网络, 而真实的无线网络存在大量无线设备, 此时将提供大规模的可用 D2D 通信, 当上述关键技术涉及的网络规模都由 1 拓展为  $n$  时, 技术难度可想而知, 因此如何建立大规模网络的 D2D 通信, 上述众多关键技术都存在大量的技术难点需要攻克。

## 3.2 D2D 与未来网络发展架构设计

5G 通信计划在 2020 年面世, 5G 异构网络具有混合性、复杂性等特点, 加之大量无线设备的同时接入和不同网络设备的差异性<sup>[71]</sup>, 使未来无线网络中的 D2D 通信将产生难以预料的困难。一方面, 异构网络的出现为 D2D 通信的近邻发现、时钟同步和资源分配带来了更多挑战, 需要一个综合的控制器来实现网络的集中管理和接入优化, 利用有限的频谱资源实现高效、流畅的通信; 另一方面, 大规模的 D2D 设备同时接入将会导致工业自动化网络不堪重负, 软件定义网络和网络功能虚拟化已经成为未来移动通信技术的新宠, 利用 SDN/NFV 技术就可以将底层的异构网络进行抽象, 通过控制层将其看成统一的资源进行调度, 有效地从全局角度对无线接入网络进行集中控制和资源分配, 利用模式选择和负载均衡, 实现各智能终端的快速、稳定的接入, 最大化地打开云服务的运用空间。这种全

新的通信理论及接入方法必将成为 D2D 通信系统的另一个研究重点。

从目前情况看, D2D 表现和发挥的舞台就是 IoT 和 5G, 而事实上, 这 2 种技术都没有成型的体系架构。5G 期待于 2020 年商用, 而 IoT 期望于 2025 年全面铺开。并且, 研究者还要关注的是, 这 2 种通信体系各自演进的同时, 协同工作将成为他们沟通、扩展应用范围的主流方式。新兴的 D2D 技术可以均衡分流 5G 系统中的数据量, 同时丰富 IoT 的接入方式, 未来通信系统需要这种基于 D2D 的融合网络架构。因此未来的 D2D 研究首要解决的即是 D2D 与 5G、物联网通信系统架构, 以及在该架构下的通信建立、资源管理、D2D 与 SDN 的结合等科学问题。

## 1) D2D 与 5G、物联网通信系统架构的设计

工业 4.0 的兴起拉动了物联网和 5G 通信技术的快速发展, 撼动了传统的通信系统体系架构, 并传递了一个信息: 工业 4.0 框架之下的通信体系结构与以往任何时代的通信系统不同, 将具有更高的信息采集和处理效率<sup>[2,72]</sup>。4G Americas 推进组在其白皮书<sup>[73]</sup>中指出, 北美社会对于 5G 的诸如海量接入、永远在线、高能效、支持灵活的空中接口等愿景不能仅依赖现有网络的演进实现, 需要全新的协议和接入技术, 换句话说, 通信体系架构也需要不断更新。日本 NTT DOCOMO 设计了包括射频网络和网络云 2 层的 5G 架构<sup>[74]</sup>, 使用 SDN 实现数据/控制平面的分离, 并提出了网络智能的概念用于系统资源管理; 由芬兰国家技术局资助的一项坦佩雷大学与 Intel 联合项目的研究成果中提出了一种 D2D 分流移动通信网络数据流量的具体机制<sup>[75]</sup>, 并通过仿真验证了 D2D 通信的引入可明显增加网络容量, 同时改善能效, 保证用户体验; 国内的未来移动通信论坛在其 5G 白皮书<sup>[76]</sup>中, 立足更灵活、更节能、更快速的需求点, 针对未来移动网络进行了深入的探讨, 在射频接入网络 (RAN, radio access network) 层面提出了新的名为 C-RAN (centralized, cooperative, cloud and clean-RAN) 的技术。

现有的扁平化 LTE 体系结构促进了移动通信系统与互联网的高度融合, 高密度、智能化、可编程则代表了未来移动通信演进的进一步发展趋势, 体系结构变革将是新一代无线移动通信系统发展的主要方向。针对上述演进目标, 本文针对未来无线通信的需求, 设计了基于数据与控制分离的下一



代移动通信网络的扁平化架构，通过光纤前传和软件定义网络实现扁平化的 2 层 5G 架构：负责接入的下层宏/小基站蜂窝网和负责管理的上层网络云。LTE 网络中的宏基站主要由 2 种功能模块组成，分别为实现基带信号处理的基带单元（BBU, base band unit）和负责射频接入的射频单元（RRU, remote radio unit），在本文提出的 5G 云架构中 BBU 被移至上层集中管理，BBU 中心和上层网络云中的核心网均由软件定义网络实现，它们之间通过回传（backhaul）链路传输数据。BBU 中心同时与下层蜂窝网络中的射频单元通过光纤建立连接，形成前传（fronthaul）网络减少网络的控制开销。相比 LTE 系统，架构中负责接入的宏基站、小基站分别使用更低和更高的频段获得更广的覆盖和更大的容量，同时小基站之间互相连接组成的 Mesh 网络能够有效地改善边缘区域的网络性能。

此外，5G 异构网络将兼容多种无线接入技术，并支持家庭娱乐、交通运输、楼宇办公、工业生产等领域中的各类无线 3C（computer, communication, consumer）终端设备的接口，综合考虑固定信道带宽的传统蜂窝通信，强调终端直接通信的新兴 D2D 技术以及为提升频谱效率设计的认知无线电信道争用机制，下一代移动通信系统中基于基站的通信主要有以下 3 种。① 直接通过基站建立的通信：基站为终端设备分配上下行信道，通信的建立依赖设备与基站间的直达链路。② 利用授权 D2D 技术建立的通信：在基站的控制下，终端设备之间通过授权频带直接进行通信。③ 基于认知无线网络

（CRN, cognitive radio network）建立的通信，认知无线电的引入是为了进一步提高频谱利用率。具体地，5G 中的蜂窝用户分为 2 种：使用固定带宽的主用户（PU, primary user）和随机争用空闲频谱资源的次级用户（SU, secondary user），次级用户虽然也通过基站建立通信，但是它们占用的通信带宽不固定，射频功率小，稳定性差。接入网中基于不同技术的终端工作模式或直接与宏基站进行通信，或通过小基站转发数据分组间接和 RRU 建立连接，最后统一由光纤前传网络实现移动设备与 BBU 中心和核心网间双向的数据传送。

尚未成型的 5G 和 IoT 不是互斥或单向包含的关系，本文在 5G 架构的相关工作基础上，根据路由机制、占用的软硬件资源、D2D 技术引入方式的不同探讨两者在未来网络中的关系。

根据工作频段的不同，D2D 通信模式可分为运行在授权频段的 D2D 和运行在免授权频段的 D2D。目前，授权频段 D2D 通信技术尚未标准化，免授权频段 D2D 技术则可由本身已相当成熟的诸如 Wi-Fi、Bluetooth、ZigBee 等技术作支持。其中授权频段 D2D 分为 D2D 通信与传统蜂窝通信共用无线频谱的有重叠方式和分配部分专用授权频段用于 D2D 的无重叠方式；免授权频段 D2D 通信又可依据控制方式细分为由基站控制通信的受控模式和终端设备负责通信管理的自主模式。针对不同 D2D 方式固有的优缺点，本文针对未来网络的融合需求，提出根据应用场景的不同选择适合的 D2D 方式最大程度地发挥新兴技术先天的优势，更好地

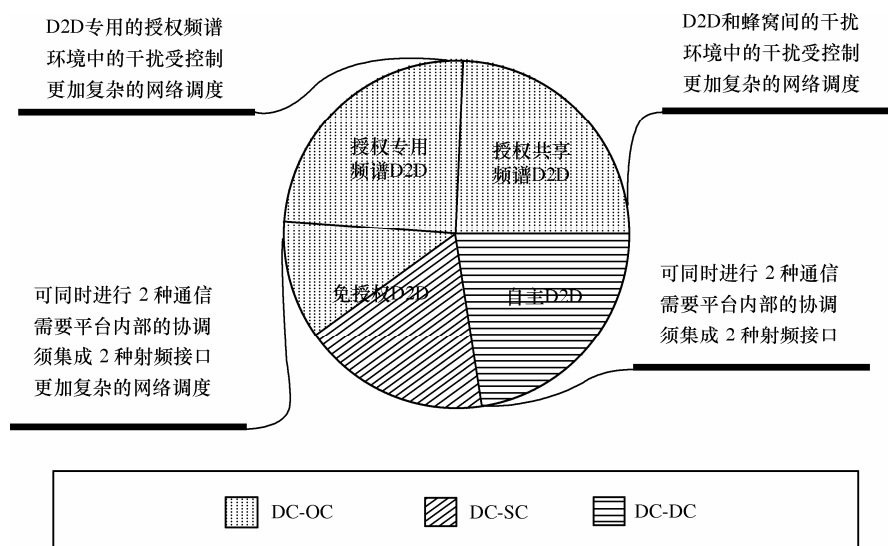


图 3 根据应用场景选择合适的 D2D 方式

融入未来的异构网络,选择依据如图 3 所示,其中,D2D 根据应用场景分为 D2D 通信和 D2D 中继,D2D 通信主要用来分流蜂窝网数据量,D2D 中继主要用来改善部分用户的服务体验。作为蜂窝通信的重要的补充,在 5G 以及未来通信网络中,根据应用场景的不同,D2D 的引入方式分为:① 运营商控制的 D2D 通信(DC-OC, D2D communication controlled by operator);② 运营商控制的 D2D 中继(DR-OC, D2D relaying controlled by operator);③ 服务器控制的 D2D 通信(DC-SC, D2D communication controlled by server);④ 服务器控制的 D2D 中继(DR-SC, D2D relaying controlled by server);⑤ 终端控制的 D2D 通信(DC-DC, D2D communication controlled by device)。特别地,DC-DC 方式中通信的建立和管理不需要运营商或服务器的参与,但要求终端设备在物理距离上邻近(devices in proximity)方能进行。

与此同时,本文在考虑 5G、IoT 以及 Internet 的技术构成差异的基础上,设计了统一管理三者的融合核心网,如图 4 所示。其中,演进的分组网核心(EPC, evolved packet core)负责传统蜂窝通信;D2D 通信服务器核心(DSC, D2D server core)负责新引入的分流 D2D 通信;资源调度器核心(RDC, resource dispatching core)负责系统资源调度以及提供对外应用程序接口(API, application programming interface)。EPC 由目前的 LTE 网络相关网元发展而来,DSC 和 RDC 则可以基于云计算(cloud computing)集群搭建,其中,统一的系统资源调度核心 RDC 主要完成频谱管理、功率控制、网络监测等功能。具体地,资源调度器核心(RDC)由射频功率控制器(RPC)、网络资源调度器(NRS)、政策及收费规则功能(PCRF)和云计算接口(CCI)组成;D2D 通信服务器核心(DSC)由信道状态信息

探测器(CSID)、终端设备功率控制器(DPC)和路由协议处理器(RPP)组成;演进的分组网核心(EPC)由频谱管理实体(SME)、服务网关(S-GW)和移动性管理实体(MME)组成,3 个核心之间通过分组数据网网关(PDN-GW)实现信息交换。

综上,本文提出了未来网络的垂直与平行通信体系,如图 5 所示。

将未来的融合网络分为上下 2 层,下层的接入网由 5G 扁平架构负责无线接入的宏/小基站蜂窝网和承载基于服务器终端直接通信的 IP 链路构成;上层网络云中的融合核心网则联接了 LTE 网络的演进分组核心和 D2D 通信服务核心,并通过资源调度核心对二者进行统一的管理,3 个核心之间通过分组数据网网关(PDN GW)传输数据,PDN GW 同时还负责连接融合核心网和 Internet。资源调度核心将虚拟的资源池作为服务提供给第三方,进而为基于 5G 资源池和 Internet 的应用提供程序接口。融合网络中的 5G 系统从结构上包含射频接入网及网络云中的 EPC、DSC、RDC 3 个核心,上下 2 层通过新型的光纤前传网交互信息,这些基站设施、通信链路和池化的网络资源协作实现对传统移动通信(蜂窝、Mesh、CRN)的支持,与此同时,资源调度核心 RDC 将对传统通信与 D2D 以及特定场景中具体采用哪种 D2D 通信模式提供选择策略。IoT 则更多体现在 Internet、服务器集群和相关的应用开发等方面,结合支持泛在连接的网络特性和 Internet 成熟的技术对基于服务器的 D2D 通信和中继提供支持,在 5G 资源池的实现过程中发挥关键作用。基于 Internet 的子系统为 DC-SC 和 DR-SC 提供适合的 IP 链路和路由机制,保障终端与 DSC 间的数据传递。面向未来网络的 5G、IoT、Internet 将不再孤立存在,从融合网的垂直层次看,三者将结合各自的技术特点共同协作完成对下层的接入和上层的

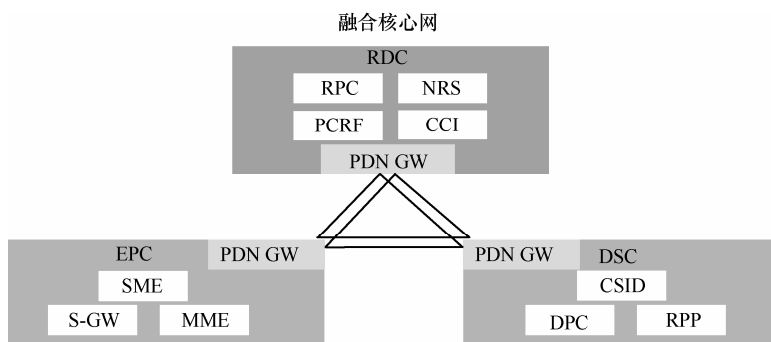


图 4 融合核心网设计

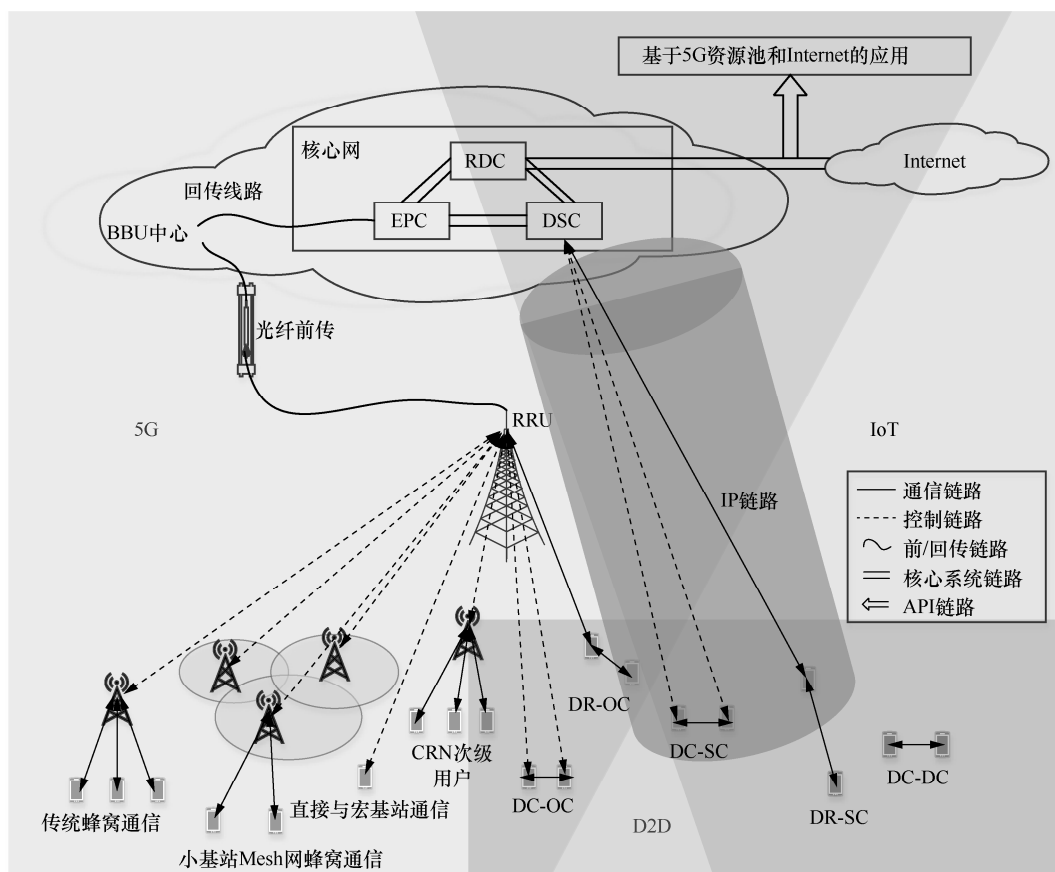


图5 基于 D2D 的 5G/IoT 融合网络

管理，体系中上层的 DSC、RDC、基于 5G 资源池和 Internet 的应用则体现了未来网络中技术融合的大方向。

## 2) D2D 与 SDN 技术

随着网络智能移动设备的爆发式增长及其差异化发展，高密度异构无线 D2D 网络必须能够同时支持大量的设备连接，保证通信的实时性和可靠性。新技术如 NFV 和 SDN 为这些目标的实现提供了新思路。SDN 是一种软件集中控制、网络开放的体系架构，核心思想在于控制与转发分离，并通过开放的软件定义实现网络功能的灵活重构，其最大价值是提高全网资源使用效率，提升网络虚拟化能力和简化网络管理。NFV 采用虚拟化技术，将传统通信设备与硬件解耦，基于通用的计算、存储、网络设备实现通信网络功能，有效提升设备的建设、管理和维护效率，显著降低资本支出和运营成本<sup>[77]</sup>。

SDN/NFV 能有效解决传统网络结构僵化的问题，满足不断增长的数据流量需求。文献[78]提出一种基于 SDN 和 NFV 的网络架构，它的基本思想是

利用 SDN 和 NFV 技术，对现有的各种异构网络进行虚拟化，满足未来对 5G 网络大容量和低延时的需求。文献[79]针对目前网络封闭和僵化的架构，将 SDN 和 NFV 技术应用于新一代网络架构的设计，通过提供全网的可编程性有效地创造了集中的网络抽象，提出一个能满足快速增长的无线数据流量需求的网络架构。文献[80]将 D2D 通信整合到 SDN 和 NFV 框架中，提出了基于虚拟无线网络的框架来提供软件定义 D2D 通信。无线移动用户可以从无线网络虚拟化和软件定义 D2D 通信中获益，所提出的方案可以显著提高实际网络设置下的系统吞吐量和用户效用。由此可见，SDN/NFV 技术与 D2D 技术的融合将促进网络的管理与性能提升，因此，该问题也是 D2D 与 5G 技术融合过程中所需深入研究的关键领域。

## 4 结束语

D2D 通信技术由于具有通信灵活、频谱利用率高优点，必将成为未来通信网络的重要支撑技术之一。本文根据 D2D 通信特性与当前研究现状，

对 D2D 关键技术发展进行了总结与概括, 分别从 D2D 设备发现与会话建立、资源分配、D2D 缓存、D2D-MIMO 4 个方面对现有研究方案进行分类与总结, 在此基础上根据未来网络发展需求, 从多蜂窝通信需求、移动性挑战、QoS 需求、大规模网络发展趋势 4 个方面对 D2D 通信技术的未来研究进行了展望, 提出了基于 D2D 的 5G+物联网通信架构, 显然, 这个架构的主体仍然是一种分布式结构。从结构上看, 这是一个自上而下铺开的大网, 核心是主干网, 下面由宏基站、微基站、微微基站编织并铺开; 从计算功能看, 由边缘计算、雾计算<sup>[8]</sup>到云计算, 计算能力越来越强大。而 D2D 技术的运用, 将使这个巨大的网络具有空前的承载和通信能力, 以并行、分布、协同的通信方式, 满足未来大规模物联网的接入和大数据处理的需求。

## 参考文献:

- [1] SHEN X. Device-to-device communication in 5G cellular networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(2): 2-3.
- [2] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 16(4): 1801-1819.
- [3] DOPPLER K, RINNE M, WIJTING C, et al. Device-to device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 47(12):42-49.
- [4] KAUFMAN B, AAZHANG B. Cellular networks with an overlaid device to device network[C]//Asilomar Conference Signals Systems and Computers. c2008: 1537-1541.
- [5] JANIS P, CHIA-HAO Y, DOPPLER K, et al. Device-to-device communication underlaying cellular communications systems[J]. International Journal of Communications Network & System Sciences, 2009, 02(3): 169-178.
- [6] IMRAN A, ZOHA A. Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [7] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.  
QIAN Z H, WANG Y J. IoT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023-1029.
- [8] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215-227.  
QIAN Z H, WANG Y J. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215-227.
- [9] GRANELLI F, GEBREMARIAM A A, USMAN M, et al. Software defined and virtualized wireless access in future wireless networks: scenarios and standards[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 26-34.
- [10] CISCO I. Cisco visual networking index: forecast and methodology 2014-2019, white paper[EB/OL]. [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white\\_paper\\_c11-481360.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html).
- [11] IMT-2020(5G) promotion group. 5G vision and requirements, white paper[EB/OL]. <http://www.IMT-2020.cn>.
- [12] HAWILO H, SHAMI A, MIRAHMADI M, et al. NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC)[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 18-26.
- [13] 张朝昆, 崔勇, 唐霁祎, 等. 软件定义网络 (SDN) 研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 62-81.  
ZHANG C K, CUI Y, TANG H Y, et al. State-of-the-art survey on software-defined networking (SDN)[J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 62-81.
- [14] BERNARDOS C J, DE LA OLIVA A, SERRANO P, et al. An architecture for software defined wireless networking[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 52-61.
- [15] SHI W, DUSTDAR S. The promise of the edge computing[J]. Computer, 2016, 49 (5): 78-81.

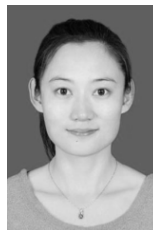
- fer model[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(1): 329-342.
- [29] YAN C, YIYANG N, HONGBO Z H U. Performance for device-to-device communication with three-time-slot two-way amplify-and-forward relay protocol[J]. China Communications, 2015, 12(11): 1-11.
- [30] SHENG M, LI Y Z, WANG X J, et al. energy efficiency and delay tradeoff in device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 92-106.
- [31] WANG S Y, GUO W S, ZHOU Z Y, et al. Outage probability for multi-hop D2D communications with shortest path routing[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1997-2000.
- [32] 周斌, 胡宏林. 提高蜂窝网络中数据分发效率的 D2D 协作转发算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 704-709.
- ZHOU B, HU H L. Cooperative device-to-device(D2D) forwarding algorithms for improving data dissemination Efficiency in cellular networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012(3): 704-709.
- [33] BURGHAL D, MOLISCH A F. Efficient channel state information acquisition for device-to-device networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 965-979.
- [34] 程永生, 朱江, 林孝康. 引入 D2D 通信的蜂窝网上行资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2822-2827.
- CHENG Y S, ZHU J, LIN X K. Uplink resource allocation in device-to-device enabled cellular networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014(12): 2822-2827.
- [35] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763.
- [36] KAUFMAN B, AAZHANG B. Cellular networks with an overlaid device to device network[C]//IEEE 42nd Asilomar Conference Signals Systems and Computers. c2008: 1537-1541.
- [37] LI X Y, LI J, LIU W, et al. Group-sparse-based joint power and resource block allocation design of hybrid device-to-device and LTE-advanced networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 41-57.
- [38] LIN M, OUYANG J, ZHU W P. Joint beamforming and power control for device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 138-150.
- [39] GONG W, WANG X. Particle swarm optimization based power allocation schemes of device-to-device multicast communication[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2015, 85(3): 1261-1277.
- [40] ABEDINI N, TAVILDAR S, LI J Y, et al. Distributed synchronization for device-to-device communications in an LTE network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1547-1561.
- [41] REN Y, LIU F Q, LIU Z, et al. Power control in D2D-based vehicular communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5547-5562.
- [42] CHENG W C, ZHANG X, ZHANG H L. Optimal power allocation with statistical QoS provisioning for D2D and cellular communications over underlaying wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 151-162.
- [43] 文凯, 卢彦博, 刘敏, 等. D2D 通信系统中一种资源分配算法的研究[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2015, 35(6): 31-38.
- WEN K, LU Y B, LIU M, et al. Resource allocation algorithm in D2D communication system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2015, 35(6): 31-38.
- [44] BEI M, HAILIN Z, ZHAOWEI Z. Joint power allocation and mode selection for D2D communications with imperfect CSI[J]. China Communications, 2015, 12(7): 73-81.
- [45] 王斌, 孟婉婷, 周为峰, 等. 提高 LTE 下含 D2D 通信的蜂窝网络公平性方案[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(2): 21-26.
- WANG B, MENG W T, ZHOU W F, et al. A scheme to improve fairness in D2D communications underlaying cellular networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(2): 21-26.
- [46] MA X, LIU J, JIANG H. Resource allocation for heterogeneous applications with device-to-device communication underlaying cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 15-26.

- [58] FENG D, YU G, XIONG C, et al. Mode switching for energy-efficient device-to-device communications in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 6993-7003.
- [59] WANG T, SUN Y, SONG L, et al. Social data offloading in D2D-enhanced cellular networks by network formation games[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 7004-7015.
- [60] TANG H, DING Z. Mixed mode transmission and resource allocation for D2D communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 162-175.
- [61] JI M Y, JI M Y, CAIRE G, MOLISCH A F. Fundamental limits of caching in wireless D2D networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(2): 849-869.
- [62] MINGYUEJI C G, MOLISCH A F. Optimal throughput-outage trade-off in wireless one-hop caching networks[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, c2013: 1461-1465.
- [63] JI M, CAIRE G, MOLISCH A F. The throughput-outage tradeoff of wireless one-hop caching networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 61(12): 1461-1465.
- [64] JI M, CAIRE G, MOLISCH A F. Wireless device-to-device caching networks: basic principles and system performance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 176-189.
- [65] ZHANG H, LI Y, JIN D, et al. Buffer-aided device-to-device communication: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(12): 67-74.
- [66] 尹充, 王莹, 林文轩, 等. D2D-MIMO 系统中基于下行预编码的干扰抑制策略[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2314-2319.
- YIN C, WANG Y, LIN W X, et al. A downlink precoding-based interference mitigation scheme in device-to-device MIMO systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014(10): 2314-2319.
- [67] JAYASINGHE K, JAYASINGHE P, RAJATHEVA N, et al. Linear precoder-decoder design of MIMO device-to-device communication underlying cellular communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(12): 4304-4319.
- [68] LIN X, HEATH R W, ANDREWS J G. The interplay between massive MIMO and underlaid D2D networking[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3337-3351.
- [69] ZHU D, et al. Rate maximized transceiver optimization for multi-antenna device-to-device communications[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. c2013: 4152-4157.
- [70] MUSTAFA H A, IMRAN M, SHAKIR M, et al. Separation framework: an enabler for cooperative and D2D communication for future 5G networks[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 419-445.
- [71] 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.
- YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Science China: Information Sciences, 2014, 44(5): 551-563.
- [72] VARGHESE A, TANDUR D. Wireless requirements and challenges in Industry 4.0[C]//Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2014 International Conference. IEEE, c2014: 634-638.
- [73] 4G Americas. 4G Americas' recommendations on 5G requirements and solutions, white paper[EB/OL]. <http://www.4gamericas.org/en/resources/white-papers>.
- [74] AGYAPONG P, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design considerations for a 5G network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 65-75.
- [75] ANDREEV S, PYATTAEV A, JOHNSON K, et al. Cellular traffic offloading onto network-assisted device-to-device connections[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 20-31.
- [76] Future mobile communication forum, rethink mobile communications for 2020+, white paper[EB/OL]. <http://www.future-forum.org/2009cn/>.
- [77] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICHIO J, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015: 1.
- [78] REQUENA J C, SANTOS J L, GUASCH V F, et al. SDN and NFV integration in generalized mobile network architecture[C]//European Conference on Networks and Communications (EuCNC 2015). Pairs, France, c2015: 154-158.
- [79] AKYILDIZ I F, LIN S C, WANG P. Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: an overview and qualitative evaluation[J]. Computer Networks, 2015, 93: 66-79.
- [80] CAI Y, YU F, LIANG C, et al. Software defined device-to-device (D2D) communications in virtual wireless networks with imperfect network state information (NSI)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015: 1.
- [81] BONOMI F, MILITO R, ZHU J. Fog computing and its role in the Internet of things[C]//Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. Helsinki, Finland, c2012: 13-16.

#### 作者简介:



钱志鸿 (1957-), 男, 吉林长春人, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于物联网、D2D、Wi-Fi、RFID 等无线网络与通信技术。



王雪 (1984-), 女, 吉林白山人, 吉林大学副教授, 主要研究方向为物联网与 D2D 通信技术。