

基于 D2D 通信的流量卸载技术综述

颜学文¹ 董 超¹ 屈毓铨²

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)¹ (火箭军工程大学信息工程系 西安 710025)²

摘 要 随着各类移动终端与高带宽需求业务的普及,蜂窝网流量已呈现出爆炸性增长的趋势;同时,由于网络用户分布不均匀,蜂窝网流量分布也存在不均衡的现象。基于 D2D(Device-to-Device)通信的流量卸载(Traffic offloading)是解决数据流量急剧增加和不均匀分布的一种经济、有效的技术。首先,根据 D2D 通信在流量卸载中所承担的任务,将基于 D2D 通信的流量卸载技术分为以 D2D 通信为目标和以 D2D 通信为中继两类;然后,详细介绍每一类技术的研究现状并分析讨论各自的优缺点;最后,提出下一步的潜在研究方向。

关键词 网络拥塞,流量卸载,D2D 通信,D2D 中继

中图分类号 TN925 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.005

Survey of D2D-based Traffic Offloading

YAN Xue-wen¹ DONG Chao¹ QU Yu-ben²

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)¹

(Department of Information Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)²

Abstract With the drastic growth of mobile smart devices and widespread use of various video traffic, the next generation wireless networks will face the explosive increase of data traffic. Meanwhile, the uneven distribution of users leads to an unbalanced distribution of cellular traffic. Device-to-device (D2D)-based traffic offloading is a cost-effective technique to solve the surging cellular traffic and unbalanced traffic distribution. Firstly, according to the role of D2D in traffic offloading, this paper divided D2D-based traffic offloading into two categories, i. e., regarding D2D communication as target and regarding D2D communication as relaying. Secondly, this paper provided a detailed overview of the advantages and disadvantages of each category. Finally, this paper proposed potential research directions in D2D-based traffic offloading.

Keywords Cellular congestion, Traffic offloading, D2D communications, D2D relay

1 引言

近年来,随着智能手机、笔记本电脑等移动终端的普及以及在线视频、手游等高带宽需求业务的日益增长,蜂窝网的移动数据流量已经远远超过传统语音通话的流量,且每年还在以指数级趋势持续增长。思科公司 2017 年的网络数据预测报告^[1]显示,2016 年度全球 IP 流量为 1.2 ZB(1 ZB=1000 EB, 1 EB=10 亿 GB),月均 96 EB,到 2021 年全球 IP 流量将达到每年 3.3 ZB,月均 278 EB。全球 IP 流量每年将以 24% 的年复合增长率增长,其中无线移动设备的数据流量将占到总 IP 数据流量的 61% 以上。值得注意的是,流量的分布往往与用户的分布紧密相关,很多时候,用户会大量聚集在某个区域,比如演唱会、大型体育赛事等会造成大量用户聚集在某个区域,这时容易造成热点区域蜂窝网拥塞而邻近区域蜂窝网空闲的流量不分布均匀现象^[2]。

移动数据流量的爆炸式增长将给现有无线通信网络的体系和架构带来巨大的挑战,而目前蜂窝网有限的频谱资源和带宽已经很难应对这样的挑战;同时,流量分布不均匀带来的资源利用不充分问题更是加大了挑战的难度。因此,如何应对移动数据流量的急剧增长和不均匀分布带来的挑战已经成为近年来的研究热点。首先,虽然架设更多的网络基础设施可以应对数据流量的增长,并有效缓解局部蜂窝网压力,但这种方法投资大、周期长、效率低^[3];其次,运营商也可以通过定价策略来限制用户访问网络,从而控制流量的增长和分布,但这种限制用户的方式并不符合技术发展的趋势,会降低用户的满意度。与这两种方案相比,移动数据流量卸载(Mobile Traffic Offloading),或简称流量卸载,已被验证为一种经济有效的解决方案。它使用各类不同的无线通信技术(如 Device-to-Device Communication,即 D2D 通信)或空闲的网络资源(比如空闲基站)来分担热点区域拥塞基站数据流量,从而有

到稿日期:2017-12-03 返修日期:2018-03-03 本文受国家自然科学基金项目(61702525,61472445,61631020,61702525,61702545)资助。

颜学文(1993-),男,硕士生,主要研究方向为 D2D 通信、未来网络;董 超(1980-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、无线通信;屈毓铨(1987-),男,博士,助教,主要研究方为无线通信;屈毓铨(1987-),男,博士,助教,主要研究方向为无线通信、D2D 通信、网络编码, E-mail:349293557@qq.com(通信作者)。

效解决局部网络 congestion 的问题^[4-5]。此外,流量卸载还可以获得其他一些性能增益^[6-8],如提高系统吞吐量、扩大网络覆盖范围、增强网络可达性,以及降低网络能耗等,这些性能的增强也能够进一步提升用户对网络服务的满意度。

目前,常见的流量卸载技术包括 Wi-Fi、Femtocell(微蜂窝)和 D2D 通信等。这些技术已经较为成熟或者部署成本较低^[9-10],相较于传统的增加基础设施或通过定价改变用户的访问方式来说,不仅方便,而且经济效益更高。其中,Wi-Fi 是基于 IEEE 802.11 系列标准的无线接入技术,主要工作在非授权频段上,可用频谱较多,但数据还是要经过基站处理和回传,在用户激增的情况下,延迟会增大,通信质量不佳。Femtocell 是一种小型、廉价、低功耗的基站,常用于异构蜂窝网来提高宏基站的频谱效率并缓解宏基站的压力,主要工作在授权频段,但当用户数量急剧增加时,这种异构网络的处理能力还是不足,而且用户的增多会产生更多的冲突干扰,从而影响通信质量。

D2D 通信是一种无需中心基础设施中继传输的本地直连通信技术。两个用户可以不经基站转发而直接通过 D2D 链路传输数据^[11],这样可以减轻基站负担,从而缓解蜂窝网压力^[12]。此外,D2D 通信不需要其他额外的设备,只需客户端的简单会话就可以搭建链路进行通信,几乎没有成本消耗,同时还具有降低端到端时延与提升频谱效率等优势。基于 D2D 通信的流量卸载被认为是未来最具前途的一种流量卸载技术^[4-5],相较于以上两种技术具有更大的优势。因此,本文主要介绍基于 D2D 通信的流量卸载技术的研究现状,并分析下一步的研究方向。

本文第 2 节对基于 D2D 通信的流量卸载技术进行分类;按照分类,第 3 节与第 4 节分别介绍以 D2D 通信为目标和以 D2D 通信为中继的流量卸载技术的研究现状;基于对国内外研究现状的分析,第 5 节指出下一步的可能研究方向;最后总结全文。

2 基于 D2D 通信的流量卸载技术的分类

按照对蜂窝网频谱使用方式的不同,D2D 通信主要分为 underlay D2D 和 overlay D2D 两种。其中,underlay D2D 是指 D2D 通信与蜂窝网通信复用同一频谱资源^[13];而 overlay D2D 是直接分出一部分蜂窝网频谱资源给 D2D 用户使用^[14]。相比于 overlay D2D 通信,underlay D2D 较复杂,因为它与蜂窝网共用同一频谱资源,需要考虑两者的冲突干扰问题。但考虑到拥塞基站的蜂窝网资源已经不能再单独分出一部分给 D2D 用户使用,研究人员多选择 underlay D2D 来实现流量卸载;同时,相比于 overlay D2D 通信,使用 underlay D2D 通信时,全网的频谱使用效率会更高,卸载数据流量的潜力更大^[15]。因此,本文重点考虑基于 underlay D2D 通信的流量卸载技术(下文如无特殊说明,D2D 均指 underlay D2D)。

如前文所述,目前蜂窝网的移动数据流量呈现两个特征:快速增长与不均匀分布。针对这两个特征,根据 D2D 通信在流量卸载中的不同作用,本文将基于 D2D 通信的流量卸载分为两类。

1)以 D2D 通信为目标的流量卸载技术。具体含义是将

原本由蜂窝网基站承担的流量卸载到 D2D 通信上^[16],D2D 通信链路作为卸载流量的承担者。如图 1 所示,在 t_1 时刻,用户 u_1 和 u_2 通过基站 B 通信;到 t_2 时刻,用户 u_1 和 u_2 直接建立 D2D 通信链路来传输数据,将流量从基站卸载到 D2D 通信上。

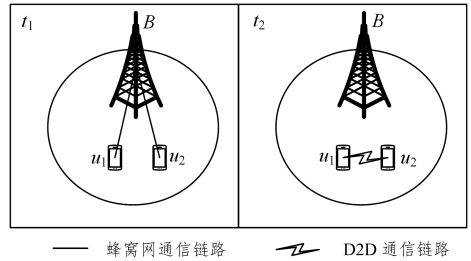


图 1 以 D2D 通信为目标的流量卸载

Fig. 1 Traffic offloading when taking D2D communications as target to offload traffic

2)以 D2D 通信为中继的流量卸载技术。不同于将 D2D 通信作为卸载流量的最终承载,它把 D2D 通信作为中继,将数据流量从拥塞基站卸载到空闲基站^[17],空闲基站是卸载流量的承担者,而 D2D 通信是卸载流量的中继。如图 2 所示,在 t_1 时刻,由于基站 B_1 服务太多,用户处于拥塞状态;在 t_2 时刻,用户 u_3 使用 D2D 链路将自己的服务请求通过 u_4 中继到基站 B_2 来完成,从而有效缓解了拥塞基站 B_1 的流量压力。

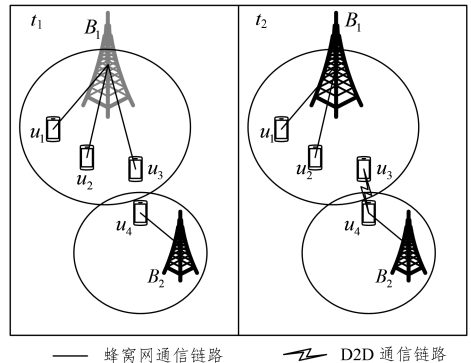


图 2 以 D2D 通信为中继的流量卸载

Fig. 2 Traffic offloading when taking D2D relaying as target

由于应用目标不同且 D2D 通信所承担的角色不同,这两类基于 D2D 通信的流量卸载技术的研究内容与关键点也不同,下面依次进行介绍与分析。

3 以 D2D 通信为目标的流量卸载

使用 D2D 通信,物理位置临近的用户之间不需要通过蜂窝基站转发数据,而是直接建立通信连接。因此,当两个用户之间的距离以及通信环境满足 D2D 通信链路建立的条件时,这两个用户之间需要传递的业务流量就可以从蜂窝网卸载到两者之间的 D2D 通信上^[18]。图 1 给出一种以 D2D 通信为目标的流量卸载技术的应用场景。实际上,现实中还存在着大量的以 D2D 通信为目标的流量卸载技术的应用场景。用户的移动性和 D2D 链路建立的过程如图 3 所示,在 t_1 时刻,用户 u_1 从基站下载缓存比较新颖的内容;在 t_2 时刻“遇到”有

内容需求的用户 u_2 时,就可以直接建立 D2D 链路来传输数据^[19]。

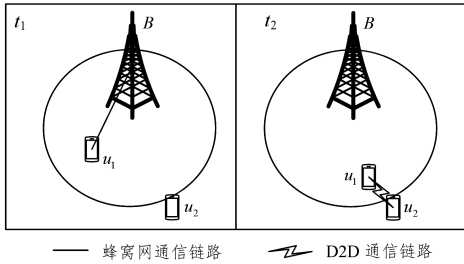


图 3 以单跳 D2D 通信为目标的流量卸载(场景 1)

Fig. 3 Traffic offloading when taking one-hop D2D communications as target (scenario one)

图 4 描述了另外一个以 D2D 通信为目标的流量卸载技术的应用场景。3 个用户 u_1, u_2 和 u_3 都对网络中的同一个内容感兴趣,在 t_1 时刻,3 个用户同时通过基站下载感兴趣的内容,容易造成网络拥塞;在 t_2 时刻,用户 u_2 从基站下载此内容并通过 D2D 通信转发给 u_1 和 u_3 ,从而大大减少了接入基站的用户数量^[20]。

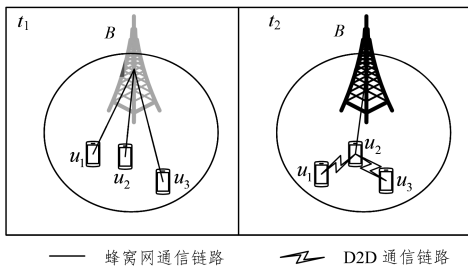


图 4 以单跳 D2D 通信为目标的流量卸载(场景 2)

Fig. 4 Traffic offloading when taking one-hop D2D communications as target (scenario two)

以上应用场景都是以单跳 D2D 通信作为卸载流量的载体,现实中,多个节点之间也可以建立多跳 D2D 通信链路。如图 5 所示,利用多跳 D2D 通信时,能在相距更远的节点之间直接进行业务交互,如图中 u_1 可以通过多跳 D2D 通信链路从用户 u_2 那里取得需要的数据,卸载更多的蜂窝网流量。

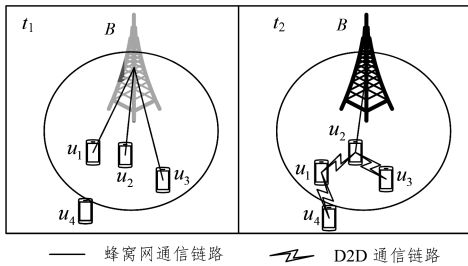


图 5 以多跳 D2D 通信为目标的流量卸载

Fig. 5 Traffic offloading when taking multi-hop D2D communications as target

可以看出,单跳 D2D 通信和多跳 D2D 通信都可以卸载蜂窝网的流量,但两者研究的侧重点有所不同,下面分别进行介绍与分析。

3.1 以单跳 D2D 通信为目标的流量卸载

如图 3 所示,在单跳 D2D 通信中,节点具有移动性,单跳

D2D 通信链路容易建立,大量移动用户有机会建立通信链路来传输数据,能有效卸载蜂窝网流量。文献[21]对机会式单跳 D2D 传输进行了专门的论证,以最大化用户的卸载流量为目标,在系统和环境的约束条件下找到了最优的流量卸载方案。其中,机会式 D2D 通信对于蜂窝网的流量卸载具有非常大的贡献。其设定了一个有多基站多用户的通信场景,且用户有 3 种数据传输方式:蜂窝网传输、D2D 已连接传输和机会式 D2D 传输。其中,D2D 已连接传输表示在已存在的通信链路上加入 D2D 链路服务用户。仿真分析表明,D2D 通信能够有效缓解蜂窝网压力,随着用户的增多,最高能将 48% 的基站流量卸载到 D2D 通信中,其中机会式单跳 D2D 传输承担了大部分的流量卸载。

另外,从图 4 可以看出,D2D 通信组网可以有效减少直接访问基站的用户数量,将数据流量卸载到单跳 D2D 通信链路上,从而缓解蜂窝网压力。Barbera 等^[22]对单跳 D2D 组网通信的搭建过程做了详细的分析。其基于节点的社交属性本质上是由节点自身移动性决定的思想,研究了如何利用社交属性选择帮助节点,并通过帮助节点将蜂窝网中的流量卸载到一跳通信范围内的 D2D 用户上。其将帮助用户分成两类:全局帮助节点和局部帮助节点。前者的选择主要依赖于整个网络的连通性,需要全局网络的先验知识;后者更多由社交属性决定,根据下载用户的兴趣爱好选取帮助节点来完成数据传输。文献[23-24]综合考虑了用户社交关系和移动方式,在满足用户接入时延需求的前提下,研究了如何选择合适的帮助节点以最大化单跳 D2D 卸载的流量。

3.2 以多跳 D2D 通信为目标的流量卸载

在一个宏基站通信覆盖范围内解决蜂窝网拥塞的问题时,可以通过大量减少直接接入蜂窝网的设备来实现^[25]。有相同兴趣爱好的用户可以通过 D2D 链路搭建通信子网,并根据在子网中所承担的数据传输量的大小选出种子节点^[26]。种子节点可以直接与基站通信,并将数据传输给子网内的用户。这种方法不仅能大量减少接入蜂窝网的用户,而且可以将大量的数据卸载到多跳 D2D 通信子网中。如图 5 所示,用户作为种子节点,将拥塞基站中的流量卸载到多跳 D2D 通信子网中。

文献[27]使用概率统计和社交感知对多个用户进行多跳通信分组。一群有相同兴趣爱好的人会经常聚会,由于用户具有不同的社会属性,在聚会的过程中会产生规律性的安排和计划。通过一段时间的概率统计分析,找出有相同规律的用户,并将他们作为一个多跳分组。长时间内组成员不会有太大的变化,他们的设备就可以构成一个多跳 D2D 子网。其中,承担大量通信任务的中心节点可以作为种子节点,既参与蜂窝网通信,也与组内用户进行多跳 D2D 通信。这样既卸载了基站的流量,又减少了用户接入基站的数量。文献[28]提出了一种由设备域、能量域和社交域三层结构组建的多跳 D2D 通信架构。其中,设备域主要研究的是设备之间的多跳组网和节点中继问题,能量域则是创新性地提出从周围环境中收集能量来支持设备的多跳通信,而社交域则是定义了用户之间的社交关系来帮助用户完成多跳分组和种子节点的选取。在作者构建的通信架构中,组内用户使用多跳 D2D 链路

传输数据,种子节点既能与基站通信,也能与组内用户进行 D2D 通信。因为设备的能量可以通过环境补充,能够持续卸载蜂窝网中的流量,所以这个方案实现了稳定、高效的流量卸载过程。文献[29]根据卸载效率对种子节点和移动中继节点的缓存内容进行动态分配,使缓存内容在多跳 D2D 通信中有效传输,而且通过对缓存内容的实时调度,可以有效降低卸载过程失败的概率,提升多跳 D2D 通信子网的卸载能力。

3.3 分析

综上所述,在以 D2D 通信为目标的流量卸载中,对于单跳 D2D 通信而言,由于通信链路只有一跳,传输链路建立成功的概率高,能将大量的流量从蜂窝网中卸载出来。然而,用户的移动性给 D2D 通信的管理带来了困难,携带内容的用户与需要内容的用户相遇是机会性的,这很容易影响卸载的效率。在多跳 D2D 通信中,用户能通过社交关系搭建稳定的 D2D 通信子网,大幅减少直接接入基站的客户端数量,并通过 D2D 通信子网实现高效率的流量卸载。但如何选择种子节点是构建稳定 D2D 子网的关键,不同的约束条件会选出不同的种子节点。为获得最优卸载效率,应该更全面地考虑约束条件。

此外,我们能够看出,以 D2D 通信为目标的流量卸载大多是对一个宏基站覆盖范围内的通信系统进行优化。但是,当一个宏基站成为热点并拥塞后,也很难再划分出频谱资源供 D2D 通信使用。实际上,虽然拥塞基站的蜂窝网资源已经耗尽,但附近其他基站还处于空闲状态,有充足的蜂窝网资源可以使用。这类似于频谱资源的使用情况,一方面,频谱资源都已经分配给了不同的授权用户;另一方面,大量的已分配频谱资源处于低使用率的状态。为了充分利用这些空闲基站的资源,可以将拥塞基站的流量卸载到空闲基站上,以进一步整合蜂窝网资源,扩大流量卸载的范围。下一节将介绍在基站间以 D2D 通信为中继的流量卸载技术的研究现状。

4 以 D2D 通信为中继的流量卸载

以 D2D 通信为中继的流量卸载,目的是通过 D2D 通信,将拥塞基站的流量卸载到周围的空闲基站上,从而缓解拥塞基站的流量压力。实际上,早在 D2D 通信技术兴起之前,研究人员就一直在研究基站间的负载均衡问题。目前,比较典型的解决方案是小区关联(Cell Association),即按照某种准则将用户关联到不同的基站,以更好地利用各类基站的资源^[30]。其中,负载均衡是一个重要的准则。文献[31]通过控制部分基站的功率来改变小区的覆盖范围,将不同的用户关联到不同的基站,从而实现基站之间的流量均衡。然而,传统的小区关联技术只能在用户临近的基站之间卸载流量,如果用户所在区域的基站全部拥塞,则无法进行卸载;而且通过控制功率改变小区的覆盖范围很容易产生严重的干扰问题,降低用户的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)^[32]。

如图 6 所示, B_1 和 sB_2 表示由于接入用户过多造成拥塞的宏基站和小基站。可以看到,通过小区关联控制基站的覆盖范围,将用户关联到不同的基站上,小基站 sB_2 的流量压力得到了缓解。然而,由于小区关联技术受限于用户的直接通

信距离,它只能缓解局部地区的拥塞,从图中可以看出,宏基站 B_1 在 t_1 和 t_2 时刻始终处于拥塞状态,因为与之关联的 4 个用户始终未处于其余基站的通信覆盖范围内。

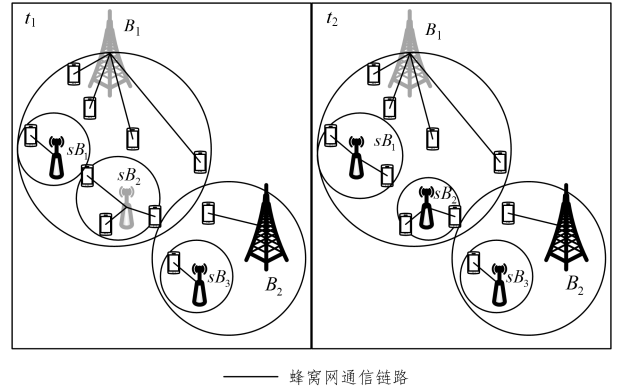


图 6 利用小区关联缓解局部蜂窝网拥塞的示例
Fig. 6 Example of mitigating local cellular congestion with cell association

通过 D2D 中继,可以将用户的流量卸载到更远的基站上,这样不仅扩大了流量卸载的范围,还有效利用了附近的空闲蜂窝网资源来缓解局部网络拥塞。如图 7 所示, t_1 时刻,宏基站 B_1 和小基站 sB_2 处于拥塞状态;在 t_2 时刻,用户 u_1, u_3 分别通过用户 u_2, u_4 的中继关联到了基站 B_2 和 sB_3 ,从而减小了基站 B_1 和 sB_2 的流量压力。可以看到,相比于传统的小区关联技术,这种使用 D2D 中继缓解局部蜂窝网压力的卸载方案能将流量在更大的地理范围内进行卸载分配,可以更好地应对用户分布不均匀造成的局部蜂窝网拥塞问题。下面将首先分析 D2D 中继的性能优势,再介绍基站之间通过 D2D 中继卸载流量的相关研究。

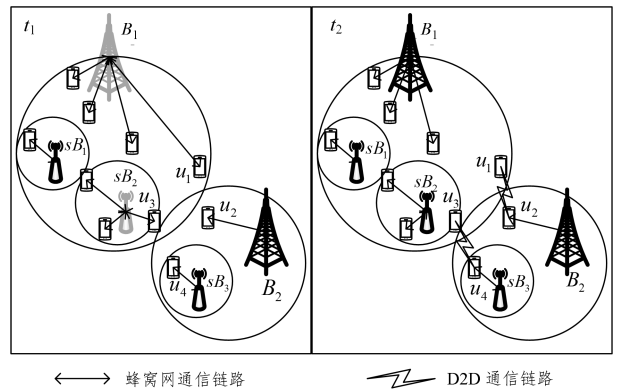


图 7 以 D2D 通信为中继的流量卸载
Fig. 7 Traffic offloading when taking D2D communications as relaying

4.1 D2D 中继的性能优势

中继是指源端用户到目的端用户不能通过一跳通信直接到达,需要另一个用户设备作为中继节点来完成通信^[33]。D2D 中继结合 D2D 通信和中继通信的优势,可以为系统带来更高的增益。

文献[34]认为中继可以消除覆盖漏洞,提高系统容量,扩大基站的覆盖范围,提高小区边缘设备的传输速率,从而也为蜂窝网络提供统一的数据速率覆盖。作者提出了一种集成中继和 D2D 通信优点的模型,以提高频谱利用率,降低路径损

耗或阴影衰落,从而提高系统的通信质量。文献[35]总结了 D2D 中继相较于传统中继通信方式具备的 4 个方面的优势:

1)降低区域内系统的功率损耗,延长设备的使用寿命;2)提高区域通信系统的吞吐率;3)提高 D2D 通信的可靠性;4)减小小基站的通信负荷。文献[36]还提出将 D2D 通信作为中继辅助技术来增强 LTE-A 网络的流量卸载能力;联合考虑了端到端数据传输速率、设备能耗和端到端延时 3 个约束来选择中继节点,建立 D2D 中继通信链路,以缓解蜂窝网的压力。

可以看到,D2D 通信作为中继在提升蜂窝网数据传输速率、降低能耗、提高系统吞吐率等方面都有很强的性能增益。因此,在蜂窝网拥塞的情况下,研究人员引入 D2D 中继卸载拥塞基站的流量,缓解局部蜂窝网的压力。

4.2 基于 D2D 中继的流量卸载

对于基站间的 D2D 中继通信来说,中继节点的选择方式在保证通信链路稳定、数据传输安全及网络通信低延迟等方面具有关键作用^[37]。文献[38]提出了一种基于用户位置信息的 D2D 中继协作通信方案。通过基站,源节点已知自己的位置信息和到目的节点的距离,会将包含位置信息的数据包广播给所有通信覆盖范围内的 D2D 节点,这些节点根据自己的位置信息计算出与目的节点的距离,将距离目的节点最近的用户选为 D2D 中继节点,通过这种最短路径 D2D 中继传输方案可以实现基站之间的数据传输。文献[39]将资源分配和中继选择相结合,提出了一种基于最大信道容量的 D2D 中继选择算法。作者指出,单一中继节点构成的源端到目的端的两跳 D2D 链路存在两个主要问题:如何选择中继节点,以及在使用 D2D 通信时如何选择蜂窝网用户来复用频谱资源。作者将两跳 D2D 链路通信过程分为两个时隙,源端到中继节点是第一时隙,中继节点到目的端是第二个时隙。同时,通过理论分析给出了两跳 D2D 链路的最大信道容量表达式,只要分别求出两个时隙的最大接收方的 SINR,就可以根据公式找到能实现最大通信容量的 D2D 中继节点,更好地实现基站间的流量卸载。可以看出,中继节点的选择对基站间卸载流量的效率有很大的影响,不同条件下选出的中继节点会带来不同的影响。

此外,文献[40]提出了一种基于 D2D 多跳通信的负载均衡算法,利用多跳 D2D 中继通信,灵活地在不同的宏基站、微基站之间进行流量卸载,并根据实时流量分布来调节算法,使其逐渐适应实际网络的卸载问题。文章主要提出如何实现这种流量卸载的过程,未给出详细的基于多跳 D2D 中继通信的流量卸载方案。

4.3 分析

可以看出,在基站间引入 D2D 中继能够有效卸载流量,并可以带来一些额外的性能增益。然而,目前的研究主要是针对如何实现基于 D2D 中继通信的流量卸载进行了简单的分析和论证,没有进一步分析不同的 D2D 中继方式产生的不同性能效果以及同一种中继方式在系统约束条件下能够实现的最佳性能等问题。因此,需要研究如何优化完善以 D2D 通信为中继的流量卸载技术,从而缓解热点区域的基站拥塞压力并有效平衡蜂窝网流量。

5 下一步的研究方向

根据前面的分析,以 D2D 通信为目标的流量卸载和以 D2D 通信为中继的流量卸载各有优势和相应的适用场景,但也存在各自的不足。基于以上认识,本文分别针对这两种方式提出下一步的研究方向。

在以 D2D 通信为目标的流量卸载方面,可以重点开展以下两个方面的工作。

1)由于机会式 D2D 传输具有不稳定性,需要增加用户与用户的相遇机会,并尽可能延长用户的相遇时间;同时,由于复用蜂窝网频谱资源,延长相遇时间会增大 D2D 通信与蜂窝通信的冲突。因此,可以考虑在有效控制冲突的基础上增加机会式 D2D 链路成功建立的概率,扩大卸载到 D2D 通信上的流量。

2)对于种子节点的优化,可以加入更多的实际约束条件。文献[25]只从社交关系和能耗两方面来考虑种子节点的选取。但在实际应用中,往往需要考虑时延和干扰等其他约束条件,因此可以通过增加约束条件来选择更合适的种子节点。例如,同时考虑用户的社交关系、设备的能耗和用户的时延需求 3 个方面来约束种子节点的选取,进一步优化基于 D2D 通信的流量卸载性能。

以 D2D 通信为中继的流量卸载的相关研究还比较少,可以着重考虑以下两个方面的工作。

1)对于由用户分布不均匀造成的局部网络拥塞,可以考虑引入单跳 D2D 中继通信,将部分用户的服务请求中继到空闲基站上,以缓解拥塞基站的压力。但这种中继方式会改变用户接入网络的过程,容易造成网络震荡,因此在基站间引入单跳 D2D 中继卸载流量时,需要在保证网络稳定性的条件下缓解拥塞基站的压力,这样能降低基站间 D2D 中继卸载流量所带来的负面影响。

2)单跳 D2D 中继的通信覆盖范围有限,不能利用更远距离的空闲基站的蜂窝网资源,并且所能利用的蜂窝网资源还受到通信范围的限制。对此,可以考虑引入多跳 D2D 中继扩大流量卸载的范围,让更远距离的基站参与流量卸载。但多跳 D2D 中继会带来更大的网络延时,使网络中用户的服务体验变差。因此,下一步可以考虑在满足网络延时需求的条件下,利用更远距离的空闲基站来分担拥塞基站的流量,使 D2D 中继通信覆盖范围内的每个基站所承担的流量均较小。这样,可以将更多的蜂窝网资源整合起来服务更多的用户,使网络中的蜂窝网资源得到更加合理、高效的利用。

3)小区关联对于单个宏基站覆盖范围内的用户可以实现最优的用户关联方案,有效缓解宏基站内的拥塞问题,但卸载能力有限;而 D2D 中继能实现更广的卸载范围。在实际网络中,可以考虑将小区关联和 D2D 中继进行结合。比如,首先通过小区关联使用户合理关联到宏基站覆盖范围内的不同基站上,充分利用宏基站内的蜂窝网资源。随着用户的增多,网络中的延迟和吞吐量等性能有所下降时,可以启用基站间 D2D 中继流量卸载方案,利用附近空闲基站的蜂窝网资源来缓解局部蜂窝网压力。这种结合两种技术的方案能够最大化利用蜂窝网的资源,并最大程度地缓解局部拥塞基站的压力。

如何根据网络的实时流量等因素设计最优的切换机制值得深入研究。

结束语 如何应对数据流量的激增和不均衡分布给网络体系架构以及各类技术带来的挑战,是当前亟需解决的问题,基于 D2D 通信的流量卸载是被公认的解决此问题的有效手段之一。本文对基于 D2D 通信的流量卸载的现有研究成果进行了分析比较,并提出了未来可能的研究方向,对 5G 技术的发展有一定的借鉴作用。

参考文献

- [1] CISCO I. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021 [EB/OL]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>.
- [2] CAO F M, ZHONG Z Z, FAN Z, et al. User association for load balancing with uneven user distribution in IEEE 802.11ax networks[C]//2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas: IEEE, 2016: 487-490.
- [3] LEE K, LEE J, YI Y, et al. Mobile data offloading: how much can WiFi deliver? [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(2): 536-550.
- [4] AIJAZ A, AGHVAMI H, AMANI M. A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 104-112.
- [5] REBECCHI F, AMORIM M, CONAN V, et al. Data offloading techniques in cellular networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 17(2): 580-603.
- [6] YU P S, LEE J, QUEK T Q S, et al. Traffic Offloading in Heterogeneous Networks with Energy Harvesting Personal Cells- Network Throughput and Energy Efficiency [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1146-1161.
- [7] SUN S S, LIAO W J, CHEN W T. Traffic offloading with rate-based cell range expansion offsets in heterogeneous networks [C]//2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Istanbul: IEEE, 2014: 2833-2838.
- [8] CARIA M, CHAMANIA M, JUKAN A. Trading IP routing stability for energy efficiency: A case for traffic offloading with optical by pass [C]//15th International Conference on Optical Network Design and Modeling-ONDM 2011. Bologna: IEEE, 2011: 1-6.
- [9] REBECCHI F, AMORIM M D D, CONAN V, et al. Data Offloading Techniques in Cellular Networks: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(2): 580-603.
- [10] SHEN H L, FENG J, JI Q J. Comparative Research on Mobile Data Offloading Techniques [J]. Mobile Communications, 2015, 39(22): 35-39. (in Chinese)
沈海灵, 冯捷, 纪其进. 移动数据流量卸载技术的比较研究 [J]. 移动通信, 2015, 39(22): 35-39.
- [11] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks [J]. Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [12] WANG J Y, GONG Z S, FU J L, et al. A survey on device-to-device communication [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119. (in Chinese)
王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114-119.
- [13] CELIK A, RADAYDEH R M, AL-QAHTANI F S, et al. Joint interference management and resource allocation for device-to-device (D2D) communications underlying downlink/uplink decoupled (DUDe) heterogeneous networks [C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris: IEEE, 2017: 1-6.
- [14] SWETHA G D, MURTHY G R. Selective overlay mode operation for D2D communication in dense 5G cellular networks [C]//2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Heraklion: IEEE, 2017: 704-709.
- [15] YANG Y, ZHANG Y, DAI L L, et al. Transmission Capacity Analysis of Relay-Assisted Device-to-Device Overlay/Underlay Communication [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 380-389.
- [16] CAO W, FENG G, QIN S, et al. Cellular Offloading in Heterogeneous Mobile Networks With D2D Communication Assistance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 4245-4255.
- [17] JIANG F, LIU Y, WANG B C, et al. A Relay-Aided Device-to-Device-Based Load Balancing Scheme for Multitier Heterogeneous Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(5): 1537-1551.
- [18] GAO S L. Energy Optimization Algorithms for LTE-Advanced System [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
高顺路. LTE-A 中继系统中能量优化算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [19] WU Z, PARK V D, LI J. Enabling Device to Device Broadcast for LTE Cellular Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 58-70.
- [20] ALI K, NGUYEN H X, SHAH P, et al. Architecture for Public Safety Network Using D2D Communication [C]//2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Doha: IEEE, 2016: 206-211.
- [21] LI Y, WANG Z C, JIN D P. Optimal Mobile Content Downloading in Device-to-Device communication Underlying Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 3596-3608.
- [22] BARBERA M, VIANA A, AMORIM M, et al. Data offloading in social mobile networks through VIP delegation [J]. Elsevier Ad Hoc Networks, 2014, 19: 92-110.
- [23] WANG X, CHEN M, KWON T, et al. Mobile traffic offloading by exploiting social network services and leveraging opportunistic device-to-device sharing [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3): 28-36.
- [24] WANG X, CHEN M, HAN Z, et al. TOSS: traffic offloading by social network service-based opportunistic sharing in mobile social networks [C]//IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. Toronto: IEEE, 2014: 2346-2354.
- [25] ALI K, NGUYEN H X, SHAH P, et al. D2D multi-hop relaying

services towards disaster communication system[C]//2017 24th International Conference on Telecommunications (ICT). Limasol;IEEE,2017:1-5.

- [26] TANG L, LONG Y H, CHEN Q B, et al. Multi-objective Optimization of Cross-Layer Resource Allocation in Cooperative Relay Systems [J]. *Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2011, 29(4): 331-339. (in Chinese)
唐伦, 龙叶华, 陈前斌, 等. 协作中继系统多目标联合的跨层资源分配 [J]. *应用科学学报*, 2011, 29(4): 331-339.
- [27] NUNES I O, MELO P O S V D, LOUREIRO A A F. Leveraging D2D multihop communication through social group meeting awareness[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(4): 12-19.
- [28] JIANG L, TIAN H, XING Z, et al. Social-aware energy harvesting device-to-device communications in 5G networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(4): 20-27.
- [29] WANG W, WU X, XIE L, et al. Joint storage assignment for D2D offloading systems [J]. *Elsevier Computer Communications*, 2016, 83(C): 45-55.
- [30] KHOSHKHOLGH M G, NAVAIE K, KANG G S, et al. Cell Association in Dense Heterogeneous Cellular Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, PP(99): 1-1.
- [31] GADAM M A, NG C K, NORDIN N K, et al. Hybrid Channel Gain Access Cell Association for Load Balancing in Downlink LTE-Advanced HetNets [C] // International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 337-342.
- [32] SUN Y, FENG G, QIN S, et al. User Behavior Aware Cell Association in Heterogeneous Cellular Networks [C] // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco: IEEE, 2017: 1-6.
- [33] CHENG T F. Research on Outage Performance of D 2 D Relay Communication in Multi-Band Cellular Network [D]. Nanjing:

Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)

程腾飞. 多带蜂窝网中 D2D 中继通信的中断性能研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

- [34] PAN J Y, HSU M H. Relay selection of relay-assisted Device-to-Device and uplink communication underlying cellular networks [C] // International Conference on Computing, Networking and Communications. IEEE, 2017: 980-985.
- [35] LIU F B. Research on Device to Device Relay Selection Strategy in LTE-Advanced Network [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
刘峰波. 基于 LTE-A 的 D2D 中继选择策略的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [36] MA R, CHANG Y J, CHEN H H, et al. On Relay Selection Schemes for Relay-Assisted D2D Communications in LTE-A Systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, PP(99): 1-1.
- [37] CHEN Z, ZHAO H Y, CAO Y, et al. Load balancing for D2D-based relay communications in heterogeneous network [C] // International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Mumbai: IEEE, 2015: 23-29.
- [38] ZORZI M, RAO R R. Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad hoc and Sensor Networks: Multihop Performance [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, 2(4): 337-348.
- [39] 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] // 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa: IEEE, 2012: 445-449.
- [40] LIU J J, KAWAMOTO Y C, NISHIYAMA H. Device-to-Device Communications Achieve Efficient Load Balancing in LTE-Advanced Networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(2): 57-65.

(上接第 12 页)

- [87] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based Cooperative Formation Control with Collision Avoidance for a Multi-UAV System [C] // American Control Conference. Portland, Oregon, USA, 2014: 2077-2082.
- [88] LIU M. UAV integrated navigation system under GPS failure [J]. *Journal of University of Jinan (Science & Technology)*, 2015, 29(2): 129-132. (in Chinese)
柳明. GPS 失效下的无人机组合导航系统 [J]. *济南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 29(2): 129-132.
- [89] VANEGAS F, DUNCAN C, EICH M, et al. UAV Based Target Finding and Tracking in GPS-Denied and Cluttered Environments [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016: 2307-2313.
- [90] KIM H J, KWON J W, SEO J. Multi-UAV-Based Stereo Vision System without GPS for Ground Obstacle Mapping to Assist Path Planning of UGV [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(20): 1431-1432.
- [91] HONG Y, HUANG W, CHIU F, et al. Cooperative communications in resource-constrained wireless networks [J]. *IEEE Signal*

Processing Magazine, 2007, 24(3): 47-57.

- [92] DECHTER R. Constraint Networks [J]. *Artificial Intelligence*, 1992, 49(89): 61-95.
- [93] CHI T Z, CHENG H, PAGE J R, et al. Evolving Swarm of UAVs [J]. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, 2014, 1(2): 219-232.
- [94] WANG X H, DUAN H B. Biologically adaptive robust mean shift algorithm with Cauchy predator-prey BBO and space variant resolution for unmanned helicopter formation [J]. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(11): 1-13.
- [95] DUAN H, LI P. Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.
- [96] BUSONI L, BABUSKA R, SCHUTTER B D. A Comprehensive Survey of Multiagent Reinforcement Learning [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, 2008, 38(2): 156-172.
- [97] ZENG Y, GUIXIANG W, BO X. A Basal Ganglia Network Centric Reinforcement Learning Model and Its Application in Unmanned Aerial Vehicle [J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2018, 10(2): 290-303.