



专题:5G

雾无线接入网:架构、原理和挑战

尹博南, 艾元, 彭木根

(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 为了降低前传(fronthaul)链路开销、避免传统云无线接入网基带单元池中无线信号处理大规模/高实时要求、充分利用边缘网络设备的计算和存储能力,提出了雾无线接入网络(fog computing based radio access network, F-RAN),作为异构云无线接入网络的演进。F-RAN的核心是利用用户和边缘网络设备的计算和存储功能,进行本地业务分发、分布式信号处理和分布式资源管理等。详细介绍了F-RAN的系统架构、关键技术及未来需研究的问题。

关键词: 雾无线接入网;雾计算;边缘云;边缘缓存

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016162

Fog computing based radio access networks: architecture, principles and challenges

YIN Bonan, AI Yuan, PENG Mugen

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: To reduce the burden of fronthaul link, avoid large-scale wireless signal processing in centralized baseband unit (BBU) pool, and take full advantage of processing and storage capabilities in edge devices, a fog computing based radio access network (F-RAN) was presented as an evolution form of heterogeneous cloud radio access networks. The core idea of F-RAN was to take full advantage of processing and storage capabilities in edge devices which could achieve the local distributed content delivery, the local distributed collaboration radio signal processing and the local distributed cooperative radio resource management functions. System architectures of F-RAN, promising key techniques, and researching open issues of F-RAN were discussed in detail.

Key words: fog computing based radio access network, fog computing, edge cloud, edge caching

1 引言

随着4G移动通信系统技术的成熟与标准化,5G移动通信系统的研究最近几年开始在国内外陆续展开^[1]。欧盟

最早于2012年11月宣布启动METIS(mobile and wireless communications enablers for the 2020 information society-2,2020年信息社会的无线移动通信关键技术—2)的5G研究项目,目标是为建立下一代移动和无线通信系统

收稿日期:2016-05-11;修回日期:2016-06-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB336600);国家自然科学基金资助项目(No.61361166005);国家高层次人才特殊支持计划项目

Foundation Items: The National Key Basic Research Program of China(973 Program)(No.2013CB336600), The National Natural Science Foundation of China(No.61361166005), The National Program for Special Support of Eminent Professionals

奠定基础,为未来的移动通信和无线技术在需求、特性和指标上达成共识,取得在概念、雏形、关键技术组成上的统一意见。我国也于2013年开始5G研发,2013年4月19日,IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020,国际移动通信—2020)推进组第一次会议在北京召开。与此同时,为了保障国家在5G中的知识产权比例,增强我国在5G国际标准制定中的地位,我国科技部也启动多个与5G相关的“863”计划科研项目。2016年3月,国际无线通信主流标准化组织3GPP(the 3rd Generation Partner Project)确定了第一个5G研究项目,用来定义第一个5G标准,标志着5G标准规模化展开。

近年来,产业界陆续提出了云无线接入网(cloud radio access network, C-RAN)和异构云无线接入网(heterogeneous cloud radio access network, H-CRAN)等先进网络架构,作为5G的接入网方案^[2,3]。C-RAN和H-CRAN结合软件定义网络的发展,充分利用集中式大规模云计算处理,将传统的基站分离为离用户更近的无线远端射频单元(remote radio head, RRH),和多个基带处理单元(baseband unit, BBU)集中到一起形成的BBU池,将无线信号处理和资源管理功能都集中到BBU池,能够获得集中式大规模协同信号处理和资源管理增益,无论是网络频谱效率、能量效率,还是网络规划优化管理等,都得到了非常明显的改善。

C-RAN通过把多个传统基站的无线信号处理和资源管理功能集中在BBU池,通过大规模协同信号处理解决RRH间的干扰,并通过BBU池实现有限频谱资源的共享

和复用,减少了基站站址建设和空调使用以及维护等成本,提高了能量效率和网络管理性能。C-RAN主要为非实时数据业务设计,存储、控制和通信处理等功能都集中在云计算网络层,没有考虑控制平面和业务平面的分离,前传(fronthaul)链路容量受限和BBU池的大规模集中协同信号处理时延降低了网络性能增益,并且也没有实现对现有移动通信网络的平滑过渡和兼容^[4]。C-RAN系统架构如图1所示。

H-CRAN结合了异构网络(heterogeneous network, HetNet)和C-RAN的各自优点。H-CRAN中的BBU池和已有的大功率节点(high power node, HPN)相连,可以充分利用3G和4G等蜂窝网络的宏基站实现无缝覆盖,且实现控制和业务平面功能分离。HPN用于全网的控制信息分发,把集中控制云功能模块从BBU池剥离出来。RRH用于满足热点区域海量数据业务的高速传输需求。此外,BBU池和HPN之间的数据和控制接口分别为S1和X2,其继承于现有的3GPP标准协议,以实现BBU池和HPN的协作资源管理^[5]。但实际中,RRH和BBU之间非理想的前传链路受限依然会严重影响H-CRAN的整体频谱效率和能量效率。一种可行的解决思路是利用RRH或者智能用户设备(user equipment, UE)等边缘设备中的分布式存储和分布式信号处理功能,让部分业务传输发生在本地,以减轻前传链路的开销。因此,更进一步的新型无线接入网的网络架构和解决方案值得研究与探索,以满足5G的性能目标要求。H-CRAN系统架构如图2所示。

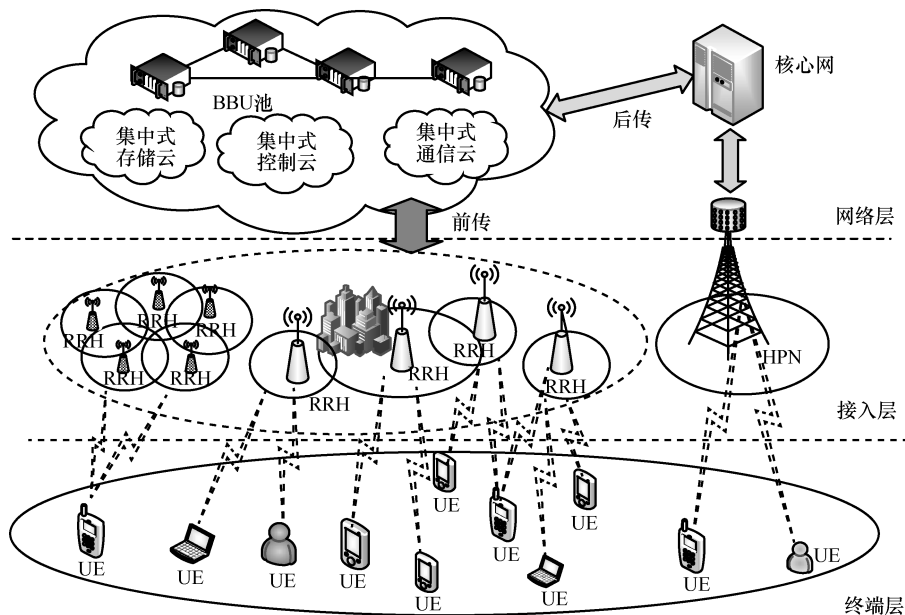


图1 C-RAN系统架构

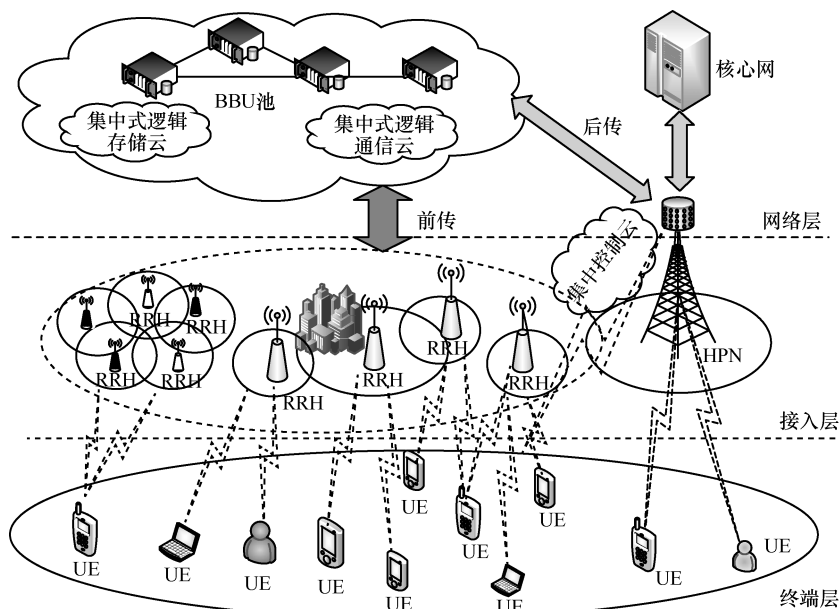


图2 H-CRAN 系统架构

“雾计算”概念最初由思科公司提出。就像雾是更贴近地面的云,雾计算是指充分开发利用更靠近用户的网络边缘设备的计算、存储、通信、控制和管理等功能,将云计算模式扩展到网络边缘。通过将“雾计算”概念融入无线接入网架构中,提出了雾无线接入网(fog computing based radio access network, F-RAN)作为5G无线接入网解决方案^[6]。F-RAN中,协作无线信号处理(collaboration radio signal processing, CRSP)和协同无线资源管理(cooperative radio resource management, CRRM)功能不仅可以在BBU池中执行,也可以在用户终端UE和RRH中实现。如果用户终端应用只需在本地处理或者需求缓存内容已经存储在邻近的RRH,则不必相连BBU池进行数据通信。F-RAN通过将更多功能在边缘设备实现,从而克服了H-CRAN中非理想前传链路受限的影响,从而实现更优的网络性能增益。

2 F-RAN 的系统架构

F-RAN系统架构如图3所示,其中BBU池与HPN功能继承于H-CRAN。所有的信号处理单元集中工作在BBU池中以共享整体的信令、数据以及信道状态信息。当网络负载升高时,运营商仅需升级BBU池来提高容量。HPN主要被用来实现控制平面的功能,为所有的F-UE(fog user equipment)提供控制信令和小区特定参考信号,并为高移动用户提供基本比特速率的无缝覆盖,从而降低不必要的切换并减轻同步限制。传统的RRH通过结合存储和CRSP

和CRRM功能演进为雾计算接入点(fog access point, F-AP),通过前传链路与BBU池相连。邻近的F-UE之间可以通过D2D(device to device, D2D)模式或者中继模式直接通信,以提高系统的频谱效率。BBU池通过集中式大规模协同多点(coordinated multiple points, CoMP)传输技术进行联合处理与调度,抑制F-AP与HPN间的跨层干扰。不同的是,由于部分CRSP功能和CRRM功能被迁移到F-AP和F-UE中,且用户可通过边缘设备的受限缓存获得数据业务而无需通过BBU池的集中式缓存,缓解了前传链路和BBU池的开销负担,并降低了传输时延。

由于F-AP具备CRSP和CRRM功能,协同多点传输技术可以实现抑制层内和层间干扰。相邻的F-AP之间互联并形成不同种类的拓扑结构以实现本地分布式CRSP。相比于网状(mesh)拓扑结构,树状拓扑结构可以节省网络部署和维护成本约50%,更适合实际的F-RAN架构。如果分布式CRSP和CRRM技术不能有效解决干扰问题,F-AP的功能将退化为传统的RRH,选择在BBU池实现全局集中式CRSP和CRRM功能进行处理。

F-RAN通过异构网络和C-RAN演进而来,完全兼容其他5G系统。一些5G先进技术,例如大规模MIMO(massive multiple input multiple output)、认知无线电、毫米波通信和非正交多址技术都可以直接应用到F-RAN中。F-RAN利用网络边缘设备的实时CRSP和灵活CRRM功能,可以实现网络对流量和无线环境动态变化的自适应过

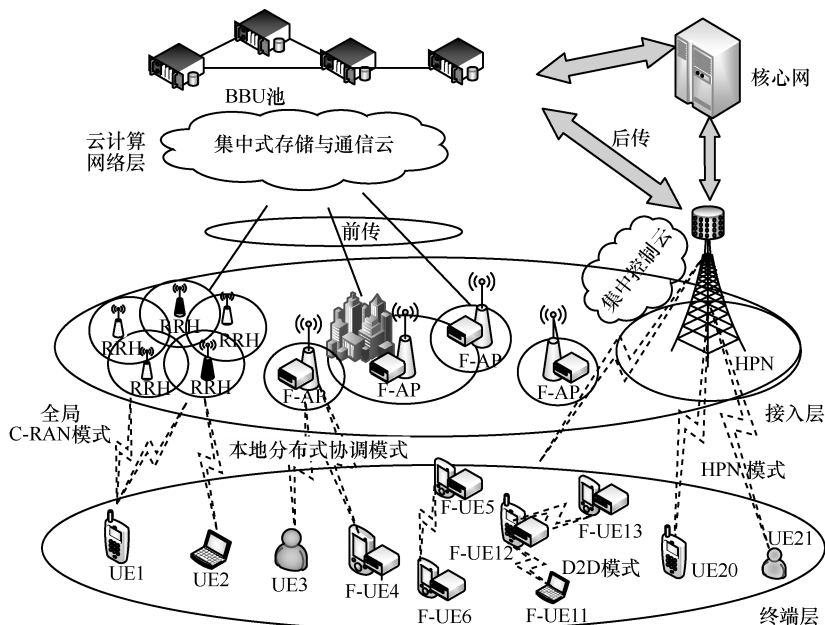


图3 F-RAN 系统架构

程,通过对于 D2D、无线中继、分布式协作和大规模集中式协作等不同模式的智能化选择,实现以用户为中心的网络功能,匹配环境区域内的业务需求。

3 F-RAN 的关键技术

3.1 传输模式选择

根据移动速度、通信距离、位置、服务质量(quality of service, QoS)需求以及处理和缓存能力等信息参数,F-UE 有 4 种可供选择的传输模式接入 F-RAN 中,分别为:D2D 和中继模式、本地分布式协作模式、全局 C-RAN 模式与 HPN 模式。所有的 F-UE 周期性地接收 HPN 的控制信令,并在其监管下做出最优传输模式选择。首先根据来自 HPN 的公共广播频段信道,估计 F-UE 的移动速度以及不同 F-UE 配对之间的距离。如果 F-UE 处于高速移动状态或者提供实时语音通信,则优先触发 HPN 模式。如果相互通信的两个 F-UE 间的相对移动速度较低并且距离不超过阈值 D_1 ,则触发 D2D 模式。相反,如果距离在阈值 D_1 与 D_2 之间并且有相邻的 F-UE 可以作为中继传输信息,则触发中继模式。此外,如果两个 F-UE 移动速率较慢,而且相互之间距离在 D_2 与 D_3 之间,或者距离不超过 D_2 但其中至少有一个 F-UE 不支持 D2D 或中继模式,则触发本地分布式协作模式,F-UE 与邻近的 F-AP 进行通信。如果本地分布式协作模式不能满足性能要求,或者两个 F-UE 间距离超过阈值 D_3 ,再或者需求内容来自云服务器,则触发全局

C-RAN 模式,此时所有的 CRSP 和 CRRM 功能都在集中式 BBU 池中实现,与 C-RAN 系统相同。自适应传输模式选择流程如图 4 所示。

D2D 和中继模式以用户为中心,通信只在终端层进行,可获得显著的性能增益并减轻前传链路负担。HPN 为这种模式下的每个 F-UE 分配设备标识。因为 D2D 通信中天线高度较低,因此其衰落受到很强的视距因素影响,不同于传统无线网络中的瑞利分布^[7]。本地分布式协作模式下,数据流量直接来自于 F-AP 而非云服务器。通过考虑实现复杂度和 CoMP 增益,F-AP 簇自适应形成并执行分布式协作。其中 CoMP 增益取决于 F-RAN 簇的拓扑结构以及连接 F-AP 的回传链路容量。通过分布式协作,小区边缘用户的下行链路频谱效率可以提高大约 70%,上行链路频谱效率可以提高大约 122%。F-AP 的分簇策略对于频谱效率的影响至关重要,图 5 比较了不同 F-AP 缓存大小下本地分布式协作模式的遍历速率与簇半径阈值之间的关系,其中, C_f 表示缓存大小, γ_{th} 表示遍历速率, L_c 表示簇半径阈值。随着簇半径阈值的增加,簇内 F-AP 数目增多,使得更多的 F-AP 服务于用户,同时信号强度增加且干扰减少,显著提高了分布式协作模式的遍历速率^[8]。此外,更大的缓存空间意味着用户有更高概率获得所需文件,同样提高了系统遍历速率。全局 C-RAN 模式下,RRH 将接收到的无线信号转发到 BBU 池,BBU 池全局集中式执行所有的 CRSP 和 CRRM 功能。不同于本地分布式协作模式,全局 C-RAN

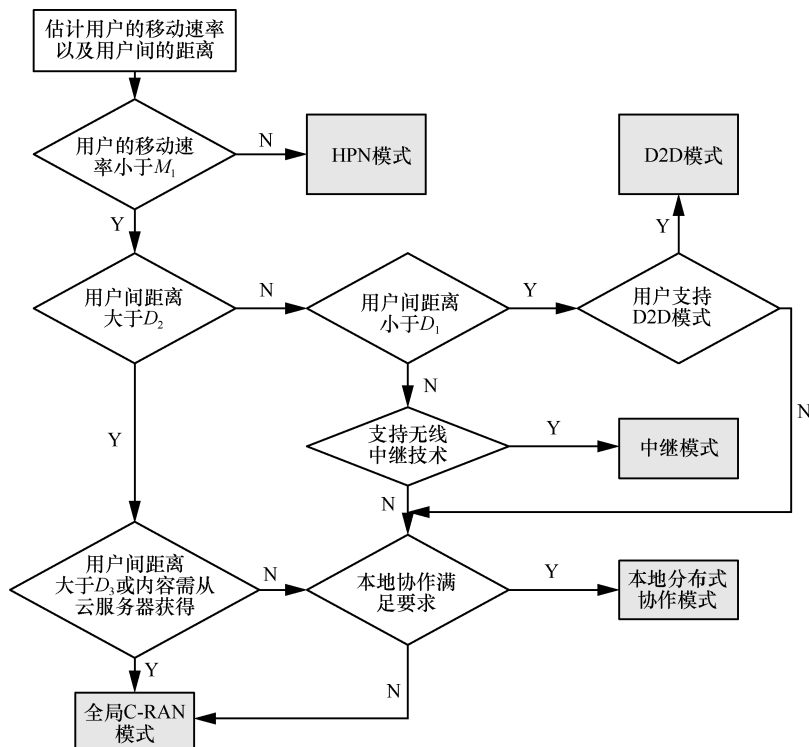
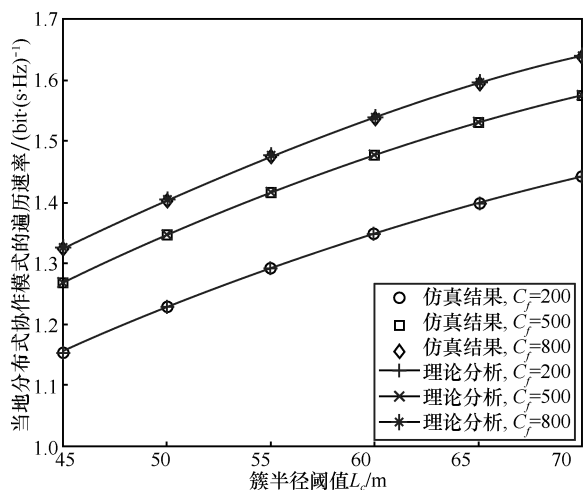


图 4 F-RAN 的自适应传输模式选择流程


 图 5 本地分布式协作模式下不同 F-AP 的 C_f 、 γ_{th} 与 L_c 的关系

模式可通过多个 RRH 共同为目标 UE 服务以提高频谱效率。同时在其他 3 种模式的协助下,前传链路的容量需求显著降低,容量和时延限制得到缓解。HPN 模式可以降低控制信道的开销并且避免不必要的切换。此模式主要用于保证基本 QoS 支持的无缝覆盖。软部分频率复用(soft fractional frequency reuse, S-FFR)方案可以用于 HPN 模式,减轻 HPN 与 F-AP 的层间干扰,显著提高系统能量效率和频谱效率^[9]。

3.2 干扰抑制

4 种传输模式下的 F-UE 共享相同的无线资源,干扰严重影响了 F-RAN 的系统性能。F-RAN 中的干扰抑制技术可以分为物理层的协作预编码与媒质访问控制(media access control, MAC)层的协调调度。

协作预编码技术主要分为全局式和分布式。全局式协作预编码包括 HPN 模式下单天线大规模 MIMO 技术以及全局 C-RAN 模式下基于分布式 F-AP 的大规模协作 MIMO 技术。分布式协作预编码技术为本地分布式协调模式下的簇内分布式 F-AP 间的联合处理 CoMP。为了平衡性能与复杂度,协作预编码大小需稀疏化设计,以降低复杂度与信道估计开销。参考文献[10]研究了 F-AP 协作预编码簇的形成策略,利用随机几何推导了固定的簇内协作策略的成功接入概率的显示表达式。将推导的理论结果作为效用函数, F-AP 的分组问题建立为联盟形成博弈问题,得出基于合并和分裂方法的簇内协作算法。为了评估性能增益,体现完全集中式和完全分布式的大类簇形成和无簇策略作为两种基础方案用于比较分析。如图 6 所示, $\tau=0.1$ 表示功率消耗部分的影响得到减轻,此时可以提供更灵活的选择用于簇大小的设置,目标数据速率随着信号与干扰加噪声比(signal to interference plus noise ratio, SINR)阈值的增加

而增加,因此平均数据速率也会在 SINR 阈值的中下等区间保持增加。然而在较高的 SINR 阈值的区间中,成功接入概率会随着阈值的增加而减少,此时平均数据速率的增长变得缓慢,甚至会开始下降。由于功率消耗固定,因此能量效率曲线的趋势与相应的平均数据速率曲线基本相同。

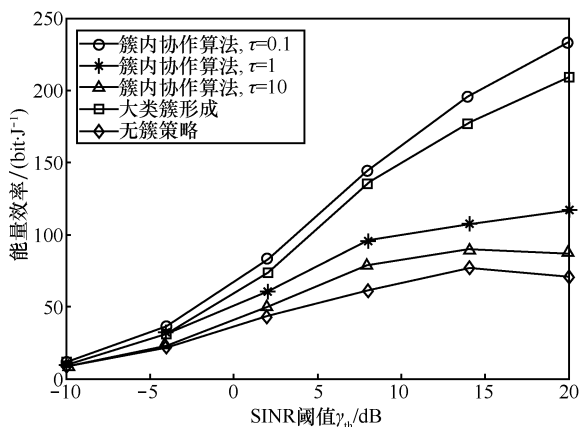


图6 不同算法下的能量效率

F-RAN 的最优协调调度方案需要解决时延感知下多目标跨层优化问题,通常有 3 种解决思路,分别为等效速度约束方法、李雅普诺夫 (Lyapunov) 优化方法以及马尔可夫 (Markov) 决策过程方法^[1]。等效速度约束方法通过使用排队论或大偏差理论将平均时延约束转化为等效平均速率约束;Lyapunov 优化方法将平均时延约束转化为最小化 Lyapunov 偏移加效用函数;Markov 决策过程方法是系统性通过随机学习或微分方程的方式推导贝尔曼 (Bellman) 方程。

3.3 边缘缓存

边缘缓存技术最初提出应用于计算机系统。已有研究表明,互联网中的大部分流量主要是由相对一小部分业务数据和多媒体文件等信息流造成。通过将高流行度的互联网内容文件缓存在网络边缘,用户无需向较远的数据中心获取文件,可以有效降低业务流量和接入时延,减轻网络负担。随着移动通信的发展,移动终端的高质量视频流、社交网络 and 智能应用等呈爆炸式增长,因此,将边缘缓存技术引入新型的移动通信系统,可以极大提高性能增益,满足日益增长的业务需求。

F-RAN 中边缘设备具备缓存与计算的能力,可为 F-UE 提供快捷内容访问与检索功能,有效缓解云服务器的负担,降低内容传递时延,通过面向对象与内容认知技

术提高性能增益和用户体验。相比于传统集中式缓存机制,F-AP 和 F-UE 中的缓存空间相对较小。参考文献[12]研究了基于 F-AP 和 F-UE 的协作缓存策略,不同文件大小情况下的最优缓存选择策略如图 7 所示。仿真结果表明,对于高流行度的文件应该优先缓存在 F-AP 中。由于 D2D 连接的不稳定性,可以考虑将较高流行度中较小尺寸的文件缓存在 F-UE 通过 D2D 连接实现共享。数值结果分析表明,根据不同流行度和大小的协作资源缓存策略,可以有效地降低系统时延。为了更好地利用边缘缓存技术提高系统性能增益,参考文献[13]研究了 F-RAN 场景下的缓存资源与传统无线资源的联合优化问题,并提出了两种基于博弈的联盟形成算法,数值结果分析表明,提出的优化算法可以极大地提高系统的能量效率与服务质量。

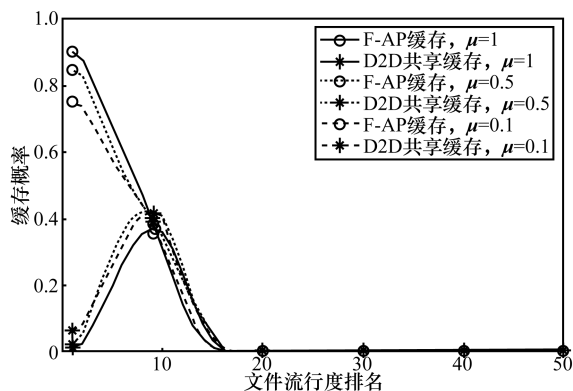


图7 F-RAN 中缓存选择的最优策略

3.4 资源调度

D2D 技术是一种利用小区分裂增益来提升网络容量、扩展网络覆盖以及改善链路传输顽健性的有效技术。然而,频谱资源的复用所带来的 F-AP 通信与 D2D 通信的跨层干扰成为了限制吞吐量提升的一个关键问题。F-RAN 可以通过 HPN 发送控制信令对用户的资源调度进行指示,因此可以设计可行的集中式 D2D 通信频谱接入方案,以有效抑制 D2D 通信和 F-AP 之间的干扰,提高系统频谱利用率。

参考文献 [7] 提出了一种集中式机会频谱接入控制 (centralized opportunistic access control, COAC) 方案,利用随机几何推导了传统的分布式随机频谱接入控制 (distributed random access control, DRAC) 方案以及所提频谱接入控制方案下 D2D 通信以及 F-AP 通信网络的成功传输概率和平均容量的理论表达式。传统的频谱资源划分策略通常基



于固定频谱划分或随机信道接入,没有考虑利用干扰信道信息进行机会式的频谱接入。对于 DRAC 方案,D2D 发送用户不知道对受干扰 F-AP 通信用户的干扰信道信息,每个用户随机从子信道中选择接入。而对于 COAC 方案,则可以利用干扰信道信息进行机会式的频谱接入。在一个典型的子信道上,分配到该子信道的 F-AP 通信用户检测 D2D 发送用户的强干扰源,F-AP 通信用户将其强干扰源集合反馈到 HPN 集中控制云。HPN 通过控制信道指示每一个 D2D 发送用户的接入/空闲状态:若该 D2D 发送用户对于子信道上任意的 F-AP 用户是强干扰源,则将其设置为空闲状态;否则若对于子信道上所有的 F-AP 用户都不是强干扰源,则将其设置为接入状态。两种频谱接入控制方案的性能与 D2D 频谱资源占用率 ε 的关系如图 8 所示。图 8 中考虑稀疏、中等和密集 3 种 D2D 通信的密度场景,分别对应 $\lambda_D/\lambda_M=10, 100$ 和 $1\ 000$ (λ_D 是 D2D 用户密度, λ_M 是 F-AP 密度且固定)。另外,图 8 中还描点绘制了渐进表达式的结果用于验证该渐进解的准确度以及 $\varepsilon=0$ (即 F-AP 通信网络性能上界,用虚线表示)和 $\varepsilon=1$ 的场景 (即 F-AP 通信网络性能下界,用点状线表示)。F-AP 通信网络成功传输概率随着 D2D 频谱资源占用率 ε 的增加而降低,而且 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时的极值与上界、 $\varepsilon=1$ 时的极值与下界能够完全对应。由于 COAC 方案中用户利用了干扰信道信息进行集中式的资源调度与机会接入,相对于 DRAC 方案显著提高了系统频谱效率。

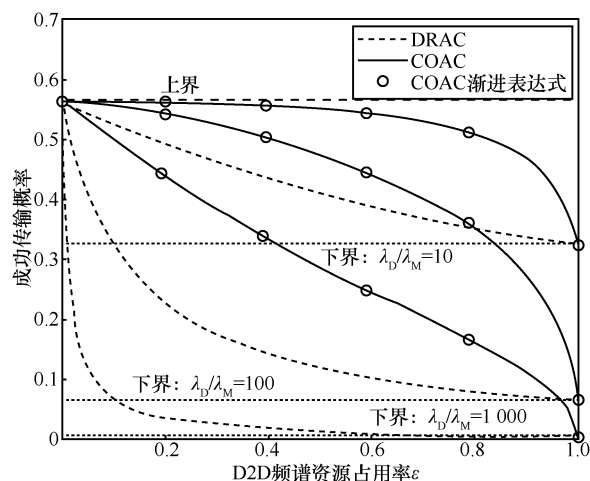


图 8 DRAC 和 COAC 方案下成功传输概率与 ε 的关系

4 F-RAN 的技术挑战及开放问题

F-RAN 作为 C-RAN 和 H-CRAN 的增强演进方案,仍

有许多技术挑战亟需解决,包括社交感知、网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 和软件定义网络 (software defined networking, SDN) 技术。

4.1 社交感知

传统 C-RAN 中,UE 在信道满足相应条件下,能够与其他 UE 建立连接进行通信。然而在实际中,用户个人参与构建了复杂的社会关系网络。用户携带的 UE 通常基于安全性的考虑不会与不熟悉的 UE 建立连接。根据不同的地理位置、兴趣和背景,用户个人或者 UE 被分为不同的社会群体。同一社会群体内的 UE 可以交换信息,不同群体间的 UE 则很少建立连接。相比于 C-RAN, F-RAN 中边缘设备通过缓存不同的社交媒体文件,其社交特征更加显现,有助于构建社会群体。因此,社交关系作为新的影响因素,有助于提高 D2D 通信以及 F-RAN 的性能增益。目前 F-RAN 中的性能分析与资源分配都没有考虑社交关系的影响,如何利用社交关系提高系统性能,并构建社交感知下 F-RAN 通信系统,值得未来研究与探索。

4.2 网络功能虚拟化和软件定义网络

NFV 通过软硬件解耦及网络功能抽象化,旨在使网络设备功能不再依赖于专用硬件,从而实现新业务的快速开发和部署、资源的灵活共享以及资本和运营开销的显著下降。F-RAN 可为 NFV 提供虚拟网络功能 (virtual network function, VNF) 间的可编程连接,这些连接通过 VNF 的协调器进行管理。F-RAN 继承于 H-CRAN,将控制层和业务层分离,通过控制器实现独立于硬件的软件重新设计和重新配置,实现网络架构的灵活性与可重构性。由于网络边缘设备需实时向 SDN 中央控制器发送信息用于决策,会严重增加前传链路负担,降低网络性能。目前 SDN 主要研究应用于互联网协议 (internet protocol, IP) 层,仍然没有完善的解决方案能够在 F-RAN 边缘设备的 MAC 层和物理层实现 SDN 功能。F-RAN 中 SDN 和 NFV 的功能实现,依然面临着安全、计算性能、VNF 互联、可移植性以及与传统 RAN 的兼容运营和管理等众多难题的挑战。

5 结束语

本文系统地介绍了新型 5G 无线接入网架构 F-RAN。与传统基于集中式云计算的网络架构 C-RAN 和 H-CRAN 相比, F-RAN 中的 CRSP 和 CRRM 功能可以在更靠近终端用户的网络边缘设备自适应地实现。此外,重点介绍了 F-RAN 的传输模式选择、干扰消除、边缘缓存和资源调度

等关键技术,并提出了相应的解决方案。F-RAN 目前仍处于研究初期,未来有许多未解决的问题值得研究与完善。

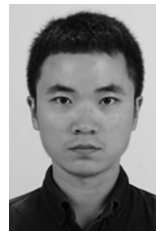
参考文献:

- [1] PENG M G, WANG C, LI J, et al. Recent advances in underlay heterogeneous networks: interference control, resource allocation, and self-organization [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 700-729.
- [2] PENG M G, SUN Y, LI X, et al. Recent advances in cloud radio access networks: system architectures, key techniques, and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016(3): 1.
- [3] PENG M G, LI Y, JIANG J, et al. Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 126-135.
- [4] PENG M G, WANG C, LAU V, et al. Fronthaul-constrained cloud radio access networks: insights and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 152-160.
- [5] PENG M G, LI Y, ZHAO Z, et al. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Network, 2014, 29(2): 6-14.
- [6] PENG M G, YAN S, ZHANG K, et al. Fog computing based radio access networks: issues and challenges[EB/OL].[2016-03-15]. <http://arxiv.org/abs/1506.04233>.
- [7] PENG M G, LI Y, QUEK T Q S, et al. Device-to-device underlaid cellular networks under rician fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 (8): 4247-4259.
- [8] YAN S, PENG M G, WANG W. User access mode selection in fog computing based radio access networks[EB/OL].[2016-03-15]. <http://arxiv.org/abs/1602.00766>.
- [9] PENG M G, ZHANG K, JIANG J, et al. Energy-efficient resource assignment and power allocation in heterogeneous cloud radio access networks [J]. Mathematics, 2014, 64 (11): 5275-5287.
- [10] ZHAO Z, PENG M G, DING Z, et al. Cluster formation in cloud-radio access networks: performance analysis and algorithms design [C]//IEEE International Conference on Communications, June 8-12, 2015, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [11] LI J, PENG M G, CHENG A, et al. Resource allocation optimization for delay-sensitive traffic in fronthaul constrained cloud radio access networks [J]. IEEE Systems Journal, 2014, 7335(1): 1-12.
- [12] HSU H, CHEN K. A resource allocation perspective on caching to achieve low latency[J]. Communications Letters IEEE, 2016, 20(1): 145-148.
- [13] ZHAO Z, PENG M G, DING Z, et al. Cluster content caching: an energy-efficient approach in cloud radio access networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016(3): 1.

【作者简介】



尹博南(1993-),男,北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室硕士生,主要研究方向为异构云无线接入网、分子通信和身体域纳米网络。



艾元(1993-),男,北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室博士生,主要研究方向为异构云无线接入网。



彭木根(1978-),男,北京邮电大学教授、博士生导师,教师发展中心主任。教育部重点实验室研究中心主任、IET 会士、中国电子学会青年科学家俱乐部副主席、北京科技人才研究会副秘书长。获得第三十届北京五四青年奖章,入选首届国家自然科学基金优秀青年基金、首届长江学者奖励计划青年学者、国家万人计划—青年拔尖人才项目等。发表本领域顶级期刊论文 40 余篇,其中 7 篇论文入选 ESI 高被引论文数据库,Google 学术引用 3 200 余次。担任 IEEE Communication Magazine、IEEE Access、IET Communications 等期刊编委,在国际学术会议上做特邀报告 7 次,7 次获得国际学术会议最佳论文奖。出版专著译著 12 部,包括英文专著 1 部,获得中华优秀出版物图书奖。获得国内外授权技术发明专利 59 项,其中转让 28 项。曾获得高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)技术发明奖一等奖(排名第二)和自然科学奖二等奖(排名第一)、中国通信学会技术发明奖一等奖(排名第一)、茅以升科技奖北京青年科技奖、国际电气和电子工程师协会亚太区杰出青年科学家奖等。