



专题:4G&5G

异构云无线接入网络:原理、架构、技术和挑战

彭木根, 艾 元

(北京邮电大学 北京 100876)

摘 要:为了缓解密集异构无线网络节点间严重的干扰,提高节点间分布式协作处理增益,同时解决云无线接入网络控制信息传输复杂、无法和已有移动通信网络融合等问题,提出了异构云无线接入网络(H-CRAN)作为5G移动通信系统的接入网解决方案。所提H-CRAN的核心是将云无线接入网络与密集异构无线网络融合,将控制平面功能从云无线接入网络中抽离,通过已存的异构大功率节点实现控制平面功能和全网的无线覆盖,利用无线射频单元实现热点区域海量业务的大容量传输。介绍了H-CRAN的系统架构、关键技术组织和研究技术挑战等。

关键词:异构云无线接入网;5G移动通信系统;云无线接入网络;云计算

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015122

Heterogeneous Cloud Radio Access Networks: Principle, Architecture, Techniques and Challenges

Peng Mugen, Ai Yuan

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To mitigate the severe inter-tier interference and enhance limited cooperative gains resulting from the constrained and non-ideal transmissions between adjacent base stations in heterogeneous networks (HetNet), and solve the emerging problems including the complex delivery of control signaling and difficult convergence with the existing mobile cellular networks in cloud radio access networks(C-RAN), heterogeneous cloud radio access networks (H-CRAN) were proposed as the promising solution for the fifth generation radio access network. The core characteristics of H-CRAN are to combine the advantages of HetNet and C-RAN, decouple the control plane from C-RAN into the existing heterogeneous high power nodes(HPN), and deploy dense simple remote radio heads (RRH) to absorb huge traffic in some hot spots. The issues of system architectures, promising key techniques, and researching challenges were discussed.

Key words: heterogeneous cloud radio access network, the fifth generation mobile communication system, cloud radio access network, cloud computing

收稿日期:2015-05-08;修回日期:2015-05-14

论文引用格式:彭木根,艾元. 异构云无线接入网络:原理、架构、技术和挑战. 电信科学, 2015122

Peng M G, Ai Y. Heterogeneous cloud radio access networks: principle, architecture, techniques and challenges. Telecommunications Science, 2015122



1 引言

在过去 20 年,高质量的无线视频流、社交网络和机器对机器(M2M)等业务和智能应用呈爆炸式增长,可以预见,未来移动互联网和物联网应用还将进一步增加,如何在这些按指数递增的无线多媒体业务中为用户提供与 ADSL 类似的体验,是 5G 移动通信系统亟需解决的难题。相比较于当前的 4G 移动通信系统,5G 单条链路的数据业务传输速率将达到 10 Gbit/s,频谱及功率效率提升 10 倍,网络覆盖的单位面积吞吐量提升 25 倍,单节点接入用户数提升 10~100 倍,端到端业务时延缩短至 1 ms,终端电池使用寿命延长 10 倍等。自 1G 移动通信系统使用以来,传统蜂窝移动通信系统接入网架构的寿命已超过 40 年,最初设计的目的是实现基站服务区域重叠尽可能少的无缝覆盖,因此提出了简单高效的六边形蜂窝组网架构,但规则蜂窝组网在简化网络设计的同时,也阻碍了网络性能的进一步提升。为了实现 5G 的性能目标要求,需要从组网架构上进行改进,打破传统规则蜂窝组网架构,提出新型 5G 和后 5G 的无线接入网络架构和先进的信号处理技术。

密集分层异构网络(heterogeneous network, HetNet)在后 4G 时代已经被提出,通过增加异构的小功率节点(low power node, LPN)实现热点地区的海量业务吸收,理论上网络谱效率和单位面积的 LPN 节点密度成正比。由于 LPN 随机布置,且和 HPN(high power node, 高功率节点)重叠覆盖同一服务区域,因此 HetNet 打破了传统规则蜂窝组网架构,但其性能严重受限于相邻 LPN 间以及 LPN-HPN 间的干扰,相关的跨层干扰和同层干扰控制一直是学术界和产业界的热点和难点^[1]。多点协作(coordinated multi-point, CoMP)传输和接收技术是抑制干扰的先进技术之一,但其性能紧密依赖于回程链路的传输容量,在非理想回程场景下,实际 HetNet 的 CoMP 性能增益只有约 20%。为了大幅度提升实际网络的组网谱效率、降低能量消耗,一种有效方法是结合大规模云计算平台进行集中实时信号处理,初步实现云计算和无线接入网络的融合,中国移动于 2009 年在业界提出了云无线接入网络(cloud radio access network, C-RAN)的解决方案。C-RAN 把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)和集中在一起的基带处理单元(base band processing unit, BBU)。多个 BBU 集中在一起,由云计算平台进行实时大规模信号处理,从而实现了 BBU 池。C-RAN

的主要技术挑战在于 BBU 池和 RRH 需要单独建立,重新组建一个小接入网,和目前已有的 HPN 无法兼容;更加困难的是,无法高效提供实时语音业务以及在密集 RRH 布置下管理控制信令下放,且消耗大量的用于业务承载的有限无线资源等。

借鉴 HetNet 中通过 HPN 实现控制和业务平面分离以及 C-RAN 中 RRH 高效支撑局部业务的特征,联合 HetNet 和 C-RAN 各自优点,充分利用大规模实时云计算处理能力,本文提出了异构云无线接入网(heterogeneous cloud radio access network, H-CRAN)作为 5G 无线接入网络的解决方案^[2]。

2 H-CRAN 系统架构和组成

如图 1 所示,H-CRAN 中数量众多的低能耗 RRH 相互合作,并在集中式 BBU 池中实现大规模协作信号处理。RRH 作为前端射频单元,具有天线模块,主要的基带信号处理和上层空中接口协议功能都在 BBU 池中实现。传统 C-RAN 的 BBU 池集合了集中式存储、集中式信号处理和资源管理调度以及集中式控制等功能,使得 C-RAN 的控制管理功能复杂,大规模无缝 C-RAN 组网难度大且不现实,无法和已有的 3G 和 4G 等蜂窝网络兼容,且支撑突发小数据业务的能力并不突出,对实时语音业务也不能很好地支持。与 C-RAN 不同,H-CRAN 中的 BBU 池和已有的 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以及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。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。在 H-CRAN 中,RRH 间的干扰由 BBU 池进行大规模协作信号处理来抑制,而 RRH 和 HPN 间的干扰可以通过 HetNet 中的 CoMP 进行分布式协调来减少^[3]。

需要说明的是,传统 C-RAN 的主要性能瓶颈之一在于回程(fronthaul)链路的容量受限,而所提的 H-CRAN 由于 HPN 的参与,避免了控制信令的传输开销,让部分用户接入 HPN 也减少了业务传输速率的开销,从而有效缓解了回程链路的容量需求,实现了 RRH 对用户的透明性,这里不需要为 RRH 分配小区识别号,简化了网络设计和规划等。所有的控制信令和系统广播信息都由 HPN 发送给用户设备(user equipment, UE),可以使 RRH 根据用户业务需求自适应地进行休眠,从而有效地节约了能量消耗,

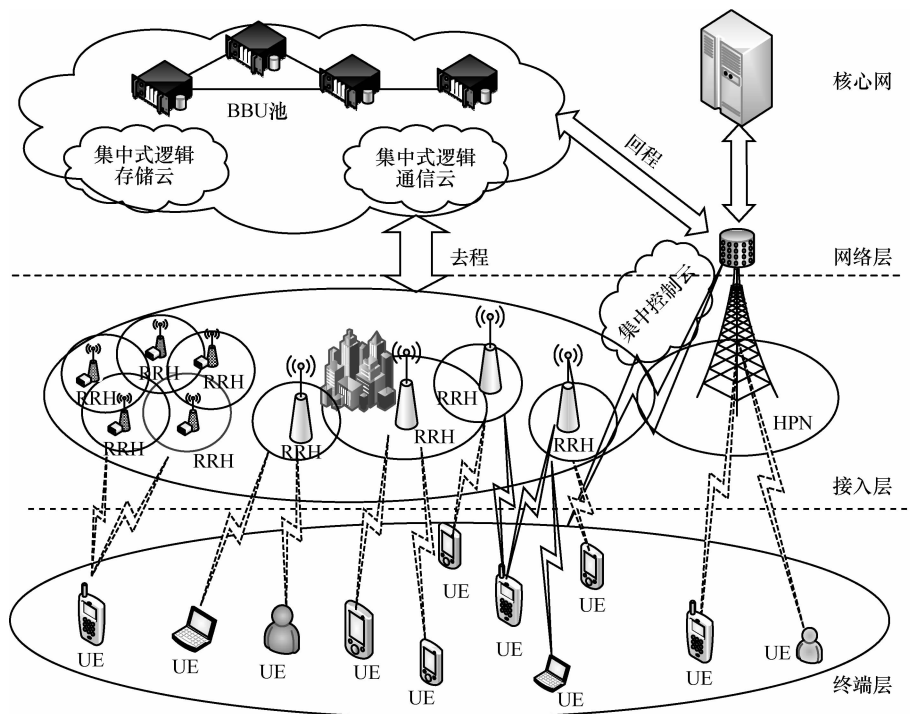


图 1 H-CRAN 系统架构和组成

实现了以用户为中心的绿色节能通信。需要说明的是,一些突发流量或即时消息业务可以由 HPN 来支撑,以确保业务能够无缝覆盖,RRH 只用于满足热点区域海量数据业务的高速传输需求。对于 RRH 和 UE 之间的无线传输来说,可以采用不同的空中接口技术,例如 IEEE 802.11 ac/ad、毫米波甚至可见光等。

为了提高 H-CRAN 的网络能量效率性能,RRH 的开关与业务量自适应匹配。当业务负载较低时,一些 RRH 在 BBU 池的集中自优化处理下进入睡眠模式;当业务负载较高时,可以自适应激活睡眠的 RRH。此外,根据 UE 承载业务和传输性能等要求,一个或者多个 RRH 自适应为其服务,如果 UE 业务量较少,同一个 RRH 的单一资源可以为多个 UE 共享使用。

利用所提的 H-CRAN,除了能显著提高网络的谱效率和能量效率性能外,还能大幅度改善移动性能。由于在不同 RRH 间移动只涉及资源调度的变化,不离开 HPN 覆盖范围就不需要进行切换,所以显著地减少了 C-RAN 系统中常用的不必要切换,降低了切换失败率、乒乓切换率和掉话率等。

3 H-CRAN 关键技术

为了发挥 H-CRAN 性能优势,需要充分挖掘基于大规

模云计算处理的优势,对传统的物理层、媒体接入控制层和网络层进行增强。对物理层而言,基于云计算的 CoMP (CC-CoMP) 技术作为 4G 系统中 CoMP 技术的增强,主要用来实现同层 RRH 间以及跨层 RRH 和 HPN 间的干扰抑制。大规模协作多天线 (large scale collaboration more antennas, LS-CMA) 技术通过在 HPN 中布置大规模的集中式天线阵列来获得天线分级和复用增益。通过基于云计算的协作无线资源管理 (CC-CRRM) 技术,实现资源的虚拟化和用户的高效资源调度,同时实现 HPN 和 RRH 间的干扰协调和移动性管理增强等。另外,通过基于云计算的网络自组织 (CC-SON) 技术,实现自配置、自优化和自治愈,提高 H-CRAN 的智能组网能力,同时降低网络规划和维护方面的成本等。

3.1 基于云计算的大规模多点协作

和 C-RAN 一样,H-CRAN 充分利用 BBU 池,对来自 RRH 的无线信号进行大规模协作处理,抑制 RRH 间的干扰,称为同层 CC-CoMP。另外,为了抑制 RRH 和 HPN 间的干扰,将使用跨层 CC-CoMP 技术。由于 RRH 和 BBU 池间的去程链路容量受限,所以需要使用信号压缩处理技术,这使得在 BBU 池中的无线信号是压缩有损信号,相应的同层 CC-CoMP 性能将有一定的损失。此外,对于每个用户而言,对同层 CC-CoMP 性能的影响主要来自有限个相邻



的RRH,所以在BBU池可以采用稀疏预编码处理,在性能降低几乎可以忽略的前提下能够显著降低同层CC-CoMP计算复杂度,从而便于进行实时云计算处理。跨层CC-CoMP受限于BBU池和HPN间的回程链路容量和信息交互实时性,由于实时理想的信道状态信息(channel state information, CSI)难以获得,跨层CC-CoMP性能和HetNet中的CoMP性能类似。

3.2 大规模集中式多天线协作处理

LS-CMA也称为大规模多输入多输出(massive MIMO)天线,在HPN处集中式地配备数百甚至上千根天线,用于改善HPN的传输容量和覆盖范围。根据大数定律,当天线数量足够多时,无线信道传播可以硬化,使得传输容量随着天线数量增加呈线性增加。已有实际网络测试结果表明,在HPN处部署100根天线,与传统的单天线配置相比,容量将获得至少10倍的提升,同时能量效率性能也将得到100倍数量级的提高。

需要说明的是,如果H-CRAN侧重挖掘LS-CMA的性能增益,让更多用户接入HPN获得业务传输,会牺牲掉CC-CoMP的性能增益,极端情况下所有用户都由HPN提供服务,则H-CRAN就退化为传统的蜂窝无线网络;但如果让较少的用户接入HPN,又会降低LS-CMA的性能;如果让所有业务都由RRH提供,则会使H-CRAN退化为C-RAN。因此,权衡LS-CMA和CC-CoMP间的性能增益,才能使H-CRAN的网络性能增益最大。

3.3 基于云计算的协作无线资源管理

相比较于C-RAN系统,H-CRAN系统增加了HPN实体,也使得用户接入、资源分配、功率分配、负载均衡等更加灵活,也更加复杂^[4]。可以使用HetNet使用的小区范围收缩技术平衡RRH和HPN间的负载,同时让用户尽量接入RRH。此外,为了减少RRH和HPN间的干扰,在负载轻的时候,可以为这两个实体配置正交的频谱资源。当负载变重时,只分配部分的频谱资源用于RRH和HPN的共享,以提供基本的无缝覆盖业务,而其他不共享的频谱资源专门用于RRH间的高速业务传输。频谱资源的配置分配是一个优化问题,需要联合功率分配和用户接入以及优化目标进行联合设计^[5]。

为了在H-CRAN系统支撑不同时延的多媒体分组数据业务,H-CRAN需要实现时延感知的CC-CRRM。传统无线资源管理主要是侧重各用户的CSI,进行无线资源和用户CSI的自适应匹配,同时兼顾优化用户的公平性和小

区资源配置等。CC-CRRM将自适应每个用户的分组业务排队状态信息(queue status information, QSI)和CSI,进行资源分配和无线信号处理,实现跨层资源协同优化。

3.4 基于云计算的网络自组织

和HetNet及C-RAN类似,由于在局部区域聚集了大量随机布置的接入节点,使得H-CRAN的网络规划优化非常复杂,依靠传统的人工网络规划优化变得不太现实,亟需采用网络自组织(SON)技术提高H-CRAN智能组网性能。SON技术能够在组网过程中最小化人工干预,减少运维成本。鉴于H-CRAN中各RRH的无线资源管理、移动性管理及射频等相关参数都需要配置和优化,且拓扑结构会随着RRH的自适应开/关而动态变化,所以SON是确保H-CRAN智能组网的关键。充分利用H-CRAN的BBU池集中大规模管理架构,基于云计算的SON(CC-SON)将基于集中式架构,联合云计算服务器中的海量网络运维数据,进行大数据挖掘,智能化完成H-CRAN各RRH的自配置、自优化和自治愈功能。需要说明的是,由于BBU池和HPN间有接口,可以通过集中式架构完成HPN的自组织功能,而不需要使用混合式的SON架构^[6]。

4 H-CRAN未来技术挑战

H-CRAN作为对HetNet和C-RAN的增强演进,虽然已经提出了清晰的系统架构和关键技术,但仍有技术挑战亟需解决,才能推进其成熟和未来应用。

4.1 理论组网性能限

和HetNet及C-RAN的理论组网性能研究类似,H-CRAN的理论组网性能限需要刻画RRH的随机分布,挖掘去程链路容量受限对大规模集中信号处理性能的影响。RRH的随机分布将通过泊松点(PPP)分布进行表征,利用随机几何,推导单用户的覆盖成功率、小区的平均频谱效率和能量效率等。利用推导的性能限闭式解,描述影响性能限的关键因素,以指导无线资源分配和网络配置等。此外,从用户角度出发,研究以用户为中心的动态RRH选择和集合设置,在减少去程链路开销和实时计算复杂度的同时,减少性能损失^[7]。

4.2 去程链路受限的性能优化

在RRH和BBU之间非理想的去程链路受限会使H-CRAN的整体频谱效率和能量效率恶化。为了减少去程链路的业务传输带宽要求,一般都需要对来自RRH的无线

符号进行压缩处理。如何减少压缩处理后的影响,是未来仍亟需突破的关键问题。一种可行方法是打破传统的完全集中式架构,充分利用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,而不需要上传到 BBU 池,从而有利地降低回程链路的开销^[8]。另外一种方法是通过 HPN 的分流,但这是以牺牲 BBU 池的大规模协作增益为代价的。

4.3 H-CRAN 未来标准化工作

H-CRAN 的标准化工作应该在未来 5G 标准框架下,实现 C-RAN 和 HetNet 的平滑演进。在 3GPP 的 R12 中已经对高阶调制、几乎空白帧、小区自动开/关、SON、节能、非理想回程的 CoMP 等技术进行标准化工作。作为这些技术的增强演进,有望在未来的 R13 和 R14 中对 H-CRAN 的网络架构、系统组成、RRH 智能开/关策略、CC-CoMP、LS-CMA、CC-CRRM 和 CC-SON 等进行标准化定义。

5 结束语

异构云无线接入网络(H-CRAN)通过结合云计算和 HetNet 技术优势,能够实现高谱效率和高能效率的组网,可以视为未来 5G 无线接入网的一个重要可选方案。本文系统介绍了 H-CRAN 的系统架构和关键技术,同时指明了未来技术挑战和相应的可能解决方法。

参考文献

- 1 Peng M G, Liu Y, Wei D Y, *et al.* Hierarchical cooperative relay based heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 48~56
- 2 Peng M G, Li Y, Jiang J M, *et al.* Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 126~135
- 3 Peng M G, Li Y, Zhao Z Y, *et al.* System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 2015, 29(2): 6~14
- 4 Peng M G, Zhang K C, Jiang J M, *et al.* Energy-efficient resource assignment and power allocation in cloud heterogeneous radio access networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014(99): 1~13
- 5 Li J, Peng M G, Cheng A L, *et al.* Delay-aware cooperative multipoint transmission with backhaul limitation in cloud-RAN. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on*

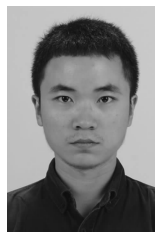
Communications (ICC) Workshops, Sydney, Australia, 2014: 665~670

- 6 Peng M G, Liang D, Wei Y, *et al.* Self-configuration and self-optimization in LTE-Advanced heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(5): 36~45
- 7 Peng M G, Yan S, Poor H V, *et al.* Ergodic capacity analysis of remote radio head associations in cloud radio access networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(4): 365~368
- 8 Peng M G, Li Y, Quek T Q S, *et al.* Device-to-device underlaid cellular networks under rician fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(8): 4247~4259

[作者简介]



彭木根,男,北京邮电大学教授、博士生导师。获得首届国家自然科学基金优秀青年基金、北京市科技新星、教育部新世纪优秀人才、茅以升科技奖北京青年科技奖等,IEEE 高级会员,北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室移动通信研究中心主任,电子学会教育工作委员会青年工作组副主任委员。2012 年 10 月被评为教授,2013 年 12 月起为美国普林斯顿大学访问教授。一直从事计算无线通信、时分双工(TDD)无线网络信息理论、协同网络编码、无线网络自组织、TDD 高效无线传输和组网的研发工作。荣获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、中国通信学会科学技术进步奖二等奖各 1 次,北京青年优秀科技论文奖二等奖 2 次,国际学术会议最佳论文奖 6 次。在国际学术期刊和国际会议上发表学术论文 200 余篇,其中 SCI 学术期刊论文 70 余篇,Google 学术引用 2 200 余次;申请国际技术发明专利 4 项,国内技术发明专利 70 余项,授权专利 60 余项,专利转让 28 项;提交标准技术文稿 50 余篇。担任 IEEE Communication Magazine、IEEE Wireless Communications、IEEE Access、IET Communications、IJCS、IJDSN、IJAP、China Communications 等国际 SCI 学术期刊论文的专刊编委、助理编委或特邀主编等;担任 ICC2015、WCNC2015、PIMRC2013、ChinaCom2012 等国际著名学术会议的专题研讨会主席等。



艾元,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。