

计算协同移动接入网络架构及演进

Architecture and Evolution of Computing Collaborative Mobile Access Networks

王晓云¹, 邓伟², 孟令同², 旷婧华², 金婧² (1. 中国移动通信有限公司, 北京 100032; 2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

Wang Xiaoyun¹, Deng Wei², Meng Lingtong², Kuang Jinghua², Jin Jing² (1. China Mobile Co., Ltd., Beijing 100032, China; 2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

摘要:

总结了C-RAN架构将无线接入信息流的处理由分布孤立式向集中协同式的演进思路,进一步提出聚合计算的移动接入网络架构,并介绍了新型架构的协议栈、基本功能及主要流程,该架构可实现更多基站更大范围的聚合计算及资源管控,持续提升频谱资源效率,破解移动接入网络架构可持续发展的难题。

关键词:

移动接入网络架构; 协同计算; 聚合计算

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.01.009

文章编号: 1007-3043(2023)01-0042-05

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It summarizes the evolution of C-RAN architecture in the processing of wireless access information flow from distributed isolated mode to centralized cooperative mode, and further proposes the mobile access network architecture of aggregate computing. The protocol stack, basic functions and main processes of the new architecture are introduced. This architecture can realize more base stations and more extensive converged computing and resource management, continuously improves the efficiency of spectrum resources, and solves the problem of sustainable development of mobile access network architecture.

Keywords:

Mobile access network architecture; Collaborative computing; Aggregate computing

引用格式: 王晓云, 邓伟, 孟令同, 等. 计算协同移动接入网络架构及演进[J]. 邮电设计技术, 2023(1): 42-46.

1 概述

随着移动通信的迅猛发展,无线通信网络中的数据流量激增,须在最小化成本和资源消耗下部署更大规模和容量的移动接入网络,这为移动通信接入网的系统架构设计带来了巨大挑战。基站是移动接入网的核心组成部分,它由3个部分组成:天线、射频单元(RRU)和基带处理单元(BBU)。1G和2G时代,BBU、RRU和供电单元等设备放置于机房的机柜中,机房必须与天线共站点以减少RRU和天线间的馈线损耗。3G初期,基站的BBU和RRU开始正式分离,RRU不必

与BBU集成在机房机柜中,RRU通常部署于天线下方,有利于降低RRU到天线间射频传输损耗,是无线接入网设备形态的第一次重大变化,虽RRU与天线物理距离拉近,但受限于传输、计算与处理能力,BBU仍与RRU位置较近,通常在100 m以内,仍属于传统分布式接入架构(Distributed Radio Access Network, D-RAN)。

随着移动互联网时代的到来,移动网流量呈爆炸式增长,若继续采用传统D-RAN架构,每一代移动通信的站址预估需增加5倍以上,面临寻址难、干扰大、功耗激增、站间协同困难等挑战。为克服以上问题,笔者及团队创新提出计算协同移动接入网架构(Centralized Radio Access Network, C-RAN)^[1]。C-RAN架

收稿日期: 2022-12-28

构围绕“集中化(Centralize)、池化(Cloud)、协作化(Coordination)、绿色(Clean)”设计理念,将多个无线站点的BBU集中于中心机房,形成BBU基带池,中心机房与RRU通过前传(光纤直驱)连接,距离可提升至10 km。对于Massive MIMO站点,为降低前传传输带宽,将BBU内物理层部分信息处理前移至RRU,成为有源天线单元(Active Antenna Unit, AAU),BBU和AAU间的前传接口也从CPRI(Common Public Radio Interface)演进为eCPRI(Enhanced-CPRI)。

C-RAN架构突破了“一基站一机房”全分布式架构下的站间协同处理限制,实现了多站一机房,为站间协同计算奠定了基础。同时C-RAN架构开启“计算协同提效能”的技术方向,破解“资源堆砌式”的发展难题,有利于提升系统频谱效率,同时节省了物理机房,减低了能耗及维护代价,已逐渐成为移动通信接入网部署新模式(见图1)^[2-4]。

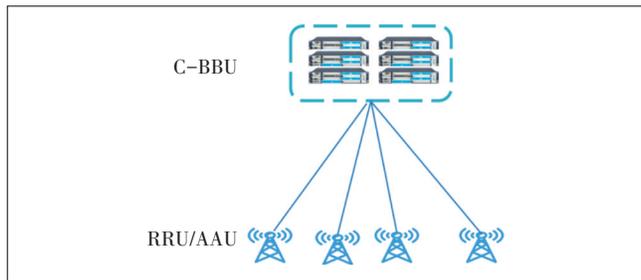


图1 移动接入网集中部署架构(C-RAN)

2 计算协同移动接入网络架构

多站BBU集中和计算协同虽能带来明显增益,但随着站点数的增加,前传带宽需求、协同处理量呈指数级激增,不可避免在集中节点增加信息流流量和计算处理的巨大负荷。要解决该问题,需要从理论上建立架构模型,通过重构接入网的计算处理找出集中和协同的最优化部署方案。

2.1 网络架构重构模型

架构重构本质是通过改变节点间的功能与定位,实现更优的目标。针对C-RAN架构,本文建立多条件约束下、多目标博弈的联合优化函数,体现了在集中、协同和泛在的多目标下,架构受计算能力、协同能力、光传输能力、供电能力等多因素制约的关系。考虑切分点、传输成本、AAU处理能力、BBU集中度等参数进行函数表达。通过求解该优化函数即能实现计算协同移动接入网络架构的设计,即得到多约束条件下的

最优切分点、集中度和AAU的簇集合。

$$\begin{aligned} & \max_{S,N,B} \left\{ f_{\text{revenue}} \left[\sin r(S,N,B) \right] - \right. \\ & \left. f_{\text{cost}} \left[c_{\text{trans}}(S,N,B), c_{\text{AAU}}(S), c_{\text{BBU}}(S,N) \right] \right\} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} d \leq D, d = \max_{b_i \in B} |b_i - b_j| \\ c_{\text{trans}} + c_{\text{AAU}} + c_{\text{BBU}} \leq \text{Threshold1} \\ P_{\text{AAU}}(S) \leq \text{Threshold2} \\ M_{\text{AAU}}/N \leq M_{\text{room}} \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中:

S ——前传功能切分点

B ——分簇策略, $B=\{B_j\}$

b_i ——基站

b_{ij} —— b_i 周围的基站

N ——基站总数

D ——最大站间距

M_{AAU} ——AAU的总数

M_{room} ——机房总数量

P_{AAU} ——AAU的处理能力

Threshold1——投资代价

Threshold2——AAU的最大处理能力

将工程数据代入式(1)进行计算,发现优化前传带宽可显著降低传输和机房的代价,进而减少投资,因此提出“均衡带宽与性能最优”的无线网基带功能重构方法。

2.2 网络架构重构方案

基于无线通信物理层数据流处理能力模型,提出“计算前移”的模式,如图2所示,通过对多目标、多约束的模型优化得到当前系统架构的最优切分,即在AAU物理层原有的射频、中射频及模数转换等模块的基础上,将BBU基带处理物理层中的FFT、资源映射和信道估计等模块迁移至AAU,同时在BBU中新增“协同处理”能力,获得协同增益的同时降低前传带宽要求,实现前传带宽和后端处理负荷的显著降低。

协同处理通过新增逻辑层实现,如图3所示的多站归簇架构中的协同处理层(Multi-Node Cooperative layer, MNC),通过计算集中、灵活协同、处理单元云化实现计算资源柔性可配,持续提升频谱效率。

2.3 网络架构应用效果

在4G和5G时代,全球已有20余个运营商采用C-RAN移动接入网络架构大规模集中部署站点,一方面减少了机房的需求,降低了机房能耗,减少了建设与维护成本。另一方面,由于多站的基带处理硬件集

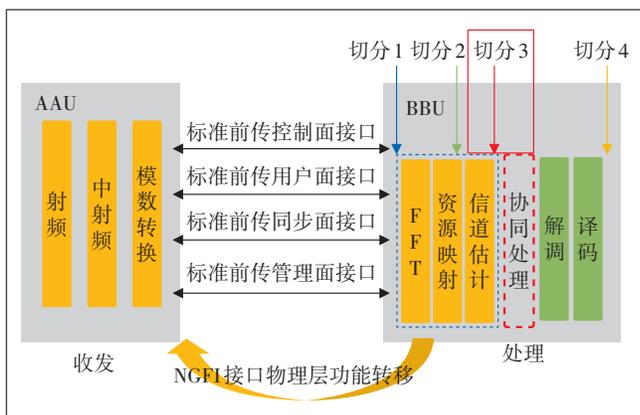


图2 物理层功能重构示意图

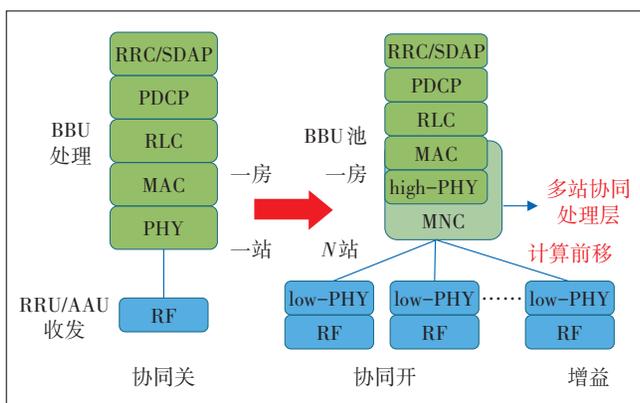


图3 传统全分布式向计算协同网络架构演进的协议栈示意

中,可对单个用户的多站收发数据进行协同计算,即将含有相同信息的多个数据进行联合处理,以提升无线接收性能^[5-6]。当前已经在现网大量部署应用计算协同架构,协同性能已得到大规模验证。

图4为多站协同接收在交叠区电平差6 dB以内的多个点位相比单站接收单个用户吞吐量的增益图。从图4中可以看出,多站协同特性相比于单站接收的增益为11.72%~31.5%,用户平均增益约为20%。测试结果表明,C-RAN架构下的多站协同接收可以显著提高交叠区用户的性能,提升系统频谱效率。

计算协同的移动接入网络架构在3G时代初步研究引入,是3G(TD-SCDMA)核心创新技术之一,并已在4G/5G广泛应用。

3 面向聚合计算的移动接入网络架构

C-RAN移动接入网络架构,虽然可以利用无线远端模块和天线提高系统频谱效率,但协同计算架构存在协同范围受限的问题。如图5所示,当前 N 个RRU/AAU对应1个集中BBU的架构,导致仅能进行单个C-

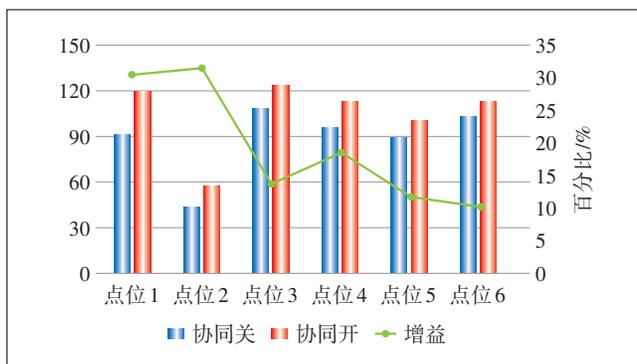


图4 多站协同发送相比于单站接收的增益图

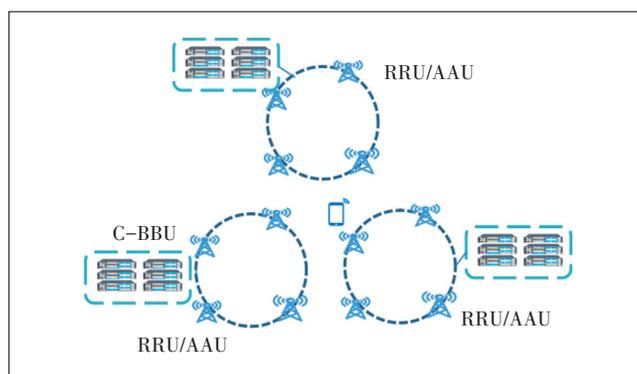


图5 C-RAN架构限制聚合计算的性能示意图

BBU(Centralized-RAN)所直连的多个RRU/AAU之间的聚合计算,无法支持跨C-BBU间的聚合计算(也无法进行更多AAU的联合收发以及跨C-BBU的计算资源共享),从而使得计算协同移动接入网络的性能无法充分发挥。

为了打破计算协同网络架构中的RRU/AAU集中度约束以及BBU计算约束,实现更多RRU/AAU聚合计算以及跨C-BBU间的资源共享,充分发挥多站协同能力,提升无线网络的频谱效率及BBU计算效能,本文提出一种新颖的面向聚合计算的移动接入网络架构,该架构是计算协同移动接入网络架构(C-RAN)的演进部署。后续章节将从移动接入网络架构网元协议层的接口切分、网元之间的关系以及相关的交互流程等方面来阐述该架构。

3.1 聚合计算的移动接入网络架构基本概念

面向聚合计算的移动接入网络架构如图6所示,该架构由C-BBU、聚合层以及多个RRU/AAU组成。C-BBU之间通过聚合层进行信息交互实现跨C-BBU的聚合计算和资源管控,聚合层主要对多个RRU/AAU数据进行聚合以及信息的交互,多个RRU/AAU进行数据的联合收发。其中的聚合计算包括上行和下行

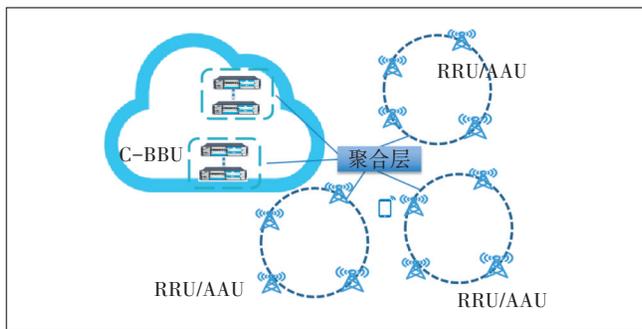


图6 面向聚合计算的移动接入网络架构

聚合计算,上行聚合计算是指将多个RRU/AAU接收到的数据进行聚合处理;下行聚合计算是指簇节点将下行数据分发到多个协作小区进行联合发送。

这种新的面向聚合计算的移动接入网络架构具有以下特点。

a) 3层架构。分裂为RRU+Low PHY的无线节点RN(Radio Node)和High PHY及以上层组成的簇节点、以及两者中间的聚合层。

b) 聚合层互通。单个RRU+Low PHY节点通过中间的聚合层可与多个High PHY节点互通,聚合层的时延性能是其关键的性能指标,将影响聚合计算的性能增益。

c) 逻辑小区分解为2层。传统小区Cell定义将仅存在于RRU+Low PHY组成的无线节点上。High PHY及MAC/RLC/PDCP层组成一个簇(Cluster)节点,簇节点上仅进行用户数据的处理,无小区级专属处理。

该架构Low PHY节点和High PHY节点可以独立部署,通过聚合层实现多个C-BBU和多个AAU的互通,打破固化的C-BBU和AAU的对应关系和协同边界范围,解决计算协同移动接入网络架构无法实现跨C-BBU协同计算的难题,可实现更多节点更大范围的聚合计算以及计算资源共享。随着传输技术和计算能力的快速提升,该架构可充分发挥多站聚合计算的能力,提升频谱效率,同时可通过算力云化共享实现以用户为中心的移动通信目标。

3.2 聚合计算的移动接入网络架构功能特性

面向聚合计算的移动接入网络架构的协议栈如图7所示,Low-PHY的协议栈延续原有3GPP的协议栈,保持以小区为单位;而High-PHY及以上的协议栈虽然保持原有架构,但将以Cluster为单位。

Cluster节点的功能定义为:

a) 用户的Cluster归属管理,即单个用户上下文信息等信息属于Cluster。

b) Cluster间的移动性、资源协调等过程管理。对于一个UE,其无线资源管理(包括随机接入、切换、重选以及寻呼等)以及调度资源由Cluster进行管理控制。比如,簇节点进行载波动态无损迁移,簇节点收到迁移请求,提前发起迁移目标的创建过程,保证服务质量,迁移过程用户无感知。

c) Cluster间算力均衡管理。该架构通过逻辑聚合多个基站算力的方式构建分布式协作簇算力池,实现跨簇的算力共享、按需编排和资源的柔性可配,持

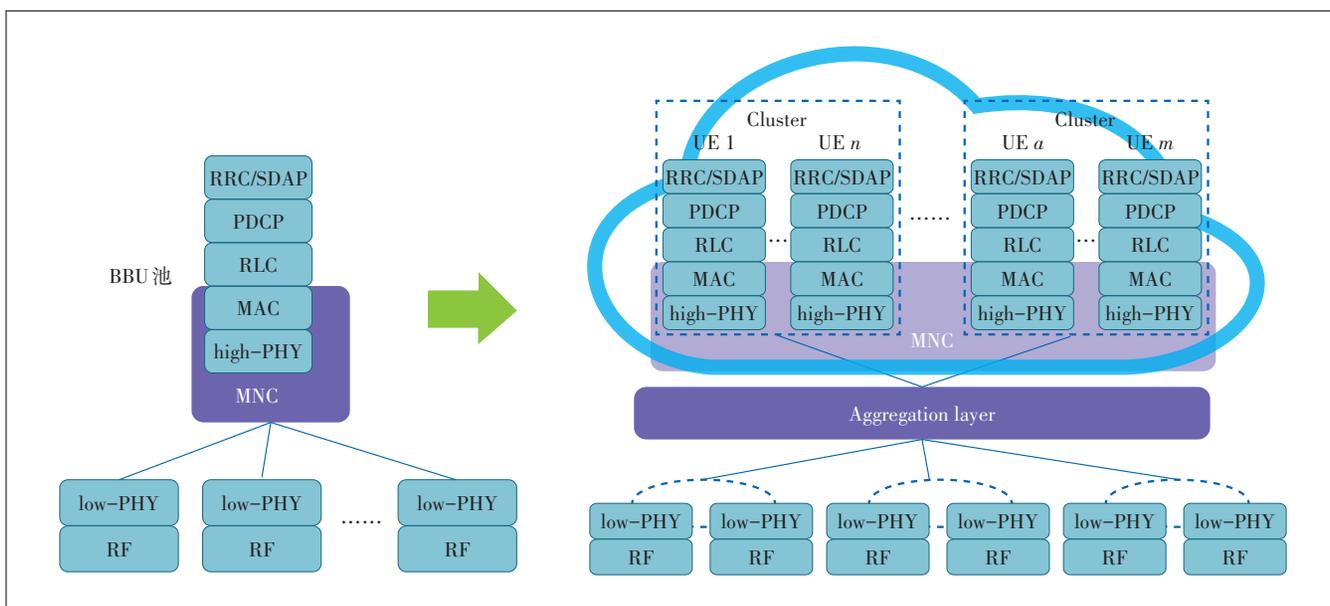


图7 面向聚合计算的移动接入网络架构协议栈

续提升频谱效率。在传输和算力达到一定要求后,可以实现基带处理云化提升系统性能。另外,Cluster间算力均衡可在满足无线通信系统的基本功能、网络实时性和稳定性要求的设计目标前提下,尤其在负载不平衡的场景,为基站上部署的数据分析和AI计算等网元智能化功能提供稳定、持续的计算和存储资源。

d) 以用户为单位,多个Cell节点的数据聚合计算。聚合计算包括下行联合收发。一方面,簇节点控制多个Cell节点同时接收交叠区UE的上行业务数据,并将联合接收到的数据进行联合接收,获取合并增益,提高用户的体验。另一方面,簇节点以用户为单位进行联合数据发送,其中多个Cell节点可进行RRU/AAU间通道校正流程,保证各RRU/AAU各通道校正后有相同的时延,使联合发送信道同向叠加。

e) Cluster内High-PHY/MAC/RLC/PDCP功能以用户为单位进行处理,RRC以Cluster为单位进行处理,也即业务面无专用小区概念,以用户为单位进行处理;控制面以簇节点为处理单元进行更高效的负载均衡、频谱资源共享和协同计算等。

3.3 基于聚合计算移动接入网络架构的性能增强

聚合计算可以实现有效的资源共享和算力聚合,因此可以通过大数据采集和分析进行性能增强。比如,引入AI机器学习中的集成学习(ensemble learning)方法来实现多节点数据采集下更为准确的特征提取,从而得到更优的解调性能。

以上行信号接收为例,对同一上行信号不同无线节点RN的接收强度差异很大,距离信号发射终端较近的RN接收信号较强,可以认为其包含的无线特征信息的信息密度较高(基于这些接收信号的解调准确性高);距离信号发射终端较远的RN接收信号强度较弱,在C-RAN接入网架构下,仅利用信息密度较强的接收信号。然而信息密度较弱的信号也存在利用价值,在算力资源不断提升的背景下,将有利于进一步增大解调准确性,进而提升频率效率。

在聚合计算的接入网架构下,低信息密度的弱信号可同样作为集成学习的数据集,随计算聚合过程中,多个RN接收信号形成的数据集的增大,信号解调的错误率将指数级下降,最终趋于零。强接收信号和弱接收信号是包含同一实际发送信号的无线特征信息的不同数据样本,如果仅采用强接收信号作为无线特征提取的数据集、丢弃弱接收信号,则等同于对高信息密度的信号的权值设置为1,低信息密度的信号

的权值设置为0。而通过将弱信号补充纳入数据集,首先通过给每一个接收信号赋予相同的权重,迭代形成模型,对容易出现解调错误的弱信号样本提高权重,对强信号的样本降低权重,然后用调整后的带权训练集训练形成模型,重复这个过程直到最后得到性能最优的模型,在集成计算过程中等效于在迭代加强了接收信号的信息密度,从而提高多RN信号的解调准确率。

4 未来展望

聚合计算移动接入网络对传输能力、计算能力以及资源的管控提出了更高的要求,需要进一步研究光纤传输、算力以及云化技术。面向5G-A和6G的演进,移动接入网络架构需要进一步拓展聚合计算的应用场景,比如,除软比特合并外,研究多cell协同MIMO的处理性能提升;同时也需要进一步完善具有聚合计算能力的移动接入网络架构的设计、资源智能管控以及相关的流程设计;进而考虑将基于聚合计算的移动接入网络架构融入到下一代移动通信设计中。

参考文献:

- [1] 王晓云,黄宇红,崔春风,陈奎林,陈沫. C-RAN:面向绿色的未来无线接入网演进[J]. 中国通信,2010,7(3):107-112.
- [2] 崔春风,黄金日,曹振. 网络功能虚拟化:离电信运营商有多远?[J]. 通信世界,2013(28):26-27.
- [3] CHIH-LIN I, HUANG J, RAN D, et al. Recent Progress on C-RAN Centralization and Cloudification [J]. Access IEEE, 2014, 2 (2) : 1030-1039.
- [4] CHIH-LIN I, LI H, KORHONEN J, et al. RAN Revolution With NGFI (xhaul) for 5G[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36, (2):541-550.
- [5] 孟令同,旷婧华,江天明,等. 5G下行CoMP技术研究及测试验证[J]. 移动通信,2021,45(2):33-37,47.
- [6] 王辉. 协作通信关键技术[D]. 北京:北京邮电大学,2015.

作者简介:

王晓云,毕业于北京邮电大学,中国移动通信集团有限公司技术部总经理,教授级高级工程师,主要研究方向为移动通信网络演进技术、4G/5G/6G超大规模网络的系统架构和组网技术;邓伟,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要研究方向为4G/NB-IoT/5G无线技术、空地一体化网络、工业互联网等;孟令同,毕业于电子科技大学,工程师,硕士,主要研究方向为移动通信无线技术和网络架构研究等;旷婧华,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要研究方向为无线通信和网络架构等;金婧,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要研究方向为无线通信、6G等。