

面向6G的无蜂窝无线接入网技术



Cell-Free Radio Access Network Technology for 6G

吴越/WU Yue¹, 王东明/WANG Dongming^{1,2},
尤肖虎/YOU Xiaohu^{1,2}

(1. 紫金山实验室, 中国 南京 211111;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 中国 南京 210096)

(1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240719.1809.004.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-10

摘要: 无蜂窝无线接入网 (CF-RAN) 作为一种新型的网络架构, 对6G的典型应用场景和关键技术指标均有重要的支撑作用。首先, 介绍了多天线技术以及网络架构的演进, 包括无蜂窝大规模多输入多输出 (CF-mMIMO) 技术以及基于该技术的无蜂窝无线接入网架构。接下来, 探讨了无蜂窝大规模MIMO技术对6G典型的应用场景的支撑, 包括基于无蜂窝系统的沉浸式通信、超大规模连接、超可靠低延迟通信、感知和通信融合、泛在连接场景, 以及基于人工智能和通信融合对无蜂窝系统的支撑, 并提出一些解决思路 and 新的研究方向。最后, 介绍了一种新型的无蜂窝无线接入网实现架构, 以及该架构对6G部分关键技术指标的支撑。

关键词: 无蜂窝大规模MIMO; 无蜂窝无线接入网; 6G

Abstract: Cell-free radio access network (CF-RAN), as a novel network architecture, plays a significant supportive role for the typical application scenarios and key technical indicators of 6G. Firstly, the evolution of multi-antenna technology as well as network architecture is introduced, including cell-free massive MIMO (CF-mMIMO) technology and the CF-RAN architecture based on this technology. Next, the support of CF-mMIMO technology for typical application scenarios of 6G, including cell-free system based immersive communication, massive communication, hyper reliable and low-latency communication, integrated sensing and communication, ubiquitous connectivity, as well as the support of cell-free system based on integrated artificial intelligence and communication, is introduced, and some solution ideas and new research directions are proposed. Finally, a novel architecture for CF-RAN and the support of this architecture for some of the key technical indicators of 6G are introduced.

Keywords: cell-free massive MIMO; cell-free radio access network; 6G

引用格式: 吴越, 王东明, 尤肖虎. 面向6G的无蜂窝无线接入网技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 14-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

Citation: WU Y, WANG D M, YOU X H. Cell-free radio access network technology for 6G [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 14-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

2023年6月, 国际电信联盟发布了《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》。该建议书汇聚了全球6G愿景共识, 描绘了6G目标与趋势, 提出了6G的典型场景及能力指标体系。

建议书明确6G将在5G三大场景基础上增强和扩展, 包含沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接六大场景。此外, 建议书还定义了15个能力指标。与5G相比, IMT-2030能力指标分为两类, 即针对IMT-2020增强的功能和支持IMT-2030扩展使用场景的新功能。每种功能在不同的使用

场景中可能具有不同的相关性和适用性。其中, 有9项功能源自现有的5G系统, 即针对IMT-2020增强的功能, 具体包括: 峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量密度、连接数密度、移动性、时延、可靠性、安全隐私韧性性能9个指标; 支持IMT-2030扩展使用场景的新功能, 具体包括: 覆盖、感知相关指标、AI相关指标、可持续性性能指标、互操作、定位6个指标。ITU建议的6G关键能力相比5G均有大幅提升, 这给6G组网带来巨大的挑战。

移动通信从1G到5G, 网络架构和系统实现架构也逐渐在演化, 支撑了从话音、数据到泛在连接的无线通信业务。在蜂窝移动通信系统发展的过程中, 从4G的研究阶段开始, 如何打破蜂窝架构, 进而持续提升移动通信系统的覆盖和容量, 一直是学术界的研究热点。无蜂窝无线接入网 (CF-

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1807200)

RAN) 以其独特的分布式接入点布局, 打破了传统蜂窝网络的小区界限, 提供了一种全新的网络覆盖和用户服务模式。这种架构通过消除小区间的硬性分割, 允许用户在不同接入点间无缝切换, 从而显著提高了网络的容量和覆盖质量。CF-RAN的物理层以分布式协作信号处理为理论基础, 形成了可扩展的无蜂窝大规模多输入多输出(CF-mMIMO) 多天线传输, 实现了基带处理的云化。当前业界认为, 3GPP R18和R19版本中加入的分布式MIMO解决方案为6G中的大规模分布式MIMO技术奠定了基础^[1], 进而也为演进到CF-mMIMO铺平了道路。

CF-RAN的极致性能使其可以较为全面地支撑6G的关键技术指标, 具体表现在:

1) CF-RAN与超高频谱效率。CF-RAN是6G提升频谱效率的核心技术, 通过大规模节点协作, 可以显著提升空分数据流的复用能力以及空分用户配对的成功率。

2) CF-RAN与超高峰值速率。结合高频段的大带宽特性, CF-RAN可以在提高系统频谱效率的基础上提高系统总吞吐量。

3) CF-RAN与用户体验速率、区域流量密度、连接数密度。CF-RAN支持密集部署的大规模节点同时同频服务大规模的空分用户, 因此, 用户体验速率、区域流量密度和连接密度均可以显著提升。面向低功耗大连接的物联网场景, 充分挖掘CF-RAN极致的上行协作能力, 可以显著提升连接数, 并降低终端功耗。

4) CF-RAN与移动性。在支持高速移动场景时, 例如高铁通信和对空覆盖(ATG), CF-RAN可以有效避免传统小区覆盖时的频繁切换问题, 结合相邻节点的协作, 可以有效提升高速移动场景的性能。

5) CF-RAN与低时延高可靠通信。正如文献[2]指出的, 利用空-时互换理论, CF-RAN可以充分利用空间资源, 换取通信时间, 降低系统的时延, 充分挖掘多节点协作传输的分集性能, 可以提升系统的可靠性。总体上, CF-RAN可以通过设计时空二维编码^[3], 获得时延-可靠性-容量的折中, 实现超低时延和超高可靠传输。

6) CF-RAN与覆盖。牺牲CF-mMIMO的复用增益, 采用上行分集接收和下行相干传输可以有效拓展覆盖能力, 因此CF-RAN可有效支撑非地面网络。

7) CF-RAN与感知和定位。建立在多节点协作基础上的CF-RAN可以通过协作定位和协作感知有效提高算法精度。

8) CF-RAN与人工智能(AI)。AI在无线接入网的资源配置和网络维护与管理中有重要的作用。因此, AI用于CF-

RAN, 可以实现智能的空时频资源分配、用户与节点的关联等, 进一步提升CF-RAN的性能。

9) CF-RAN与可持续性性能指标。CF-RAN可以在现有部署的基础上, 通过协作大幅提升系统的性能。由于高能效是CF-RAN的基本优势之一, 因此CF-RAN架构非常符合未来移动通信系统的可持续性发展要求。

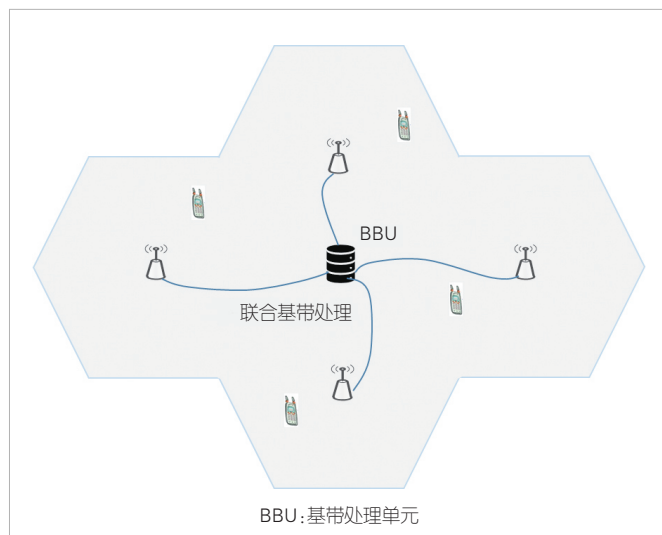
10) CF-RAN与互操作。CF-RAN可采用开放无线接入网(O-RAN)的架构, 引入新的开放接口, 因此具有良好的包容性和透明度。

1 多天线技术和网络架构的演进

1.1 多天线技术的演进

根据香农信息论, 增加并行信道的数量可以线性提高信道容量。多天线MIMO技术通过增加空间域并行信道的数量, 显著提升了无线通信系统的容量。因此, 多天线MIMO技术被视为提升移动通信系统技术指标(如频谱效率、峰值速率、可靠性等)的核心技术。

从3G到5G, 多天线技术也历经了点到点MIMO、点到多点的多用户MIMO(MU-MIMO), 以及多点到多点的多用户分布式MIMO。如图1所示, 将多个天线单元分散部署并将各天线的基带信号集中式处理, 可以形成分布式MIMO^[4]。这种分布式MIMO同样能够在相同时频资源上为多个用户服务, 从而形成多点到多点的分布式MU-MIMO通信。相比于集中式MU-MIMO, 除了可以获得复用增益之外, 分布式MU-MIMO具有诸多特有的优点^[4-5]: 1) 由于天线单元接近用户, 路径损耗较小, 提高了系统的能量效率; 2) 分布式



▲图1 分布式多输入多输出(MIMO)系统

MIMO还可以获得宏分集增益；3）分布式MU-MIMO可以化干扰为有用信号，在区域内提供较为一致的覆盖性能，并且已有的研究表明，相同天线数和发送功率下，分布式MU-MIMO的区域平均容量和中断容量均显著高于集中式MU-MIMO。

分布式MIMO引入蜂窝组网时形成了4G协作多点传输（CoMP）和5G多收发节点（Multi-TRP）的概念。虽然CoMP在4G进行了标准化研究，但是最终业界主要研究了小区间干扰协调、协作调度、协作波束赋形等技术，解决小区边界处同频复用的干扰问题。分布式MIMO带来的整体性能提升需要采用联合传输（JT）获得，包括上行联合接收机和下行相干联合传输（CJT）。对于上行联合接收，当多个TRP的基带信号汇聚到BBU时，联合接收机主要问题是多用户检测的复杂性。下行JT分为CJT和非相干联合传输（NCJT）。对于NCJT，网络侧缺少TRP之间的相位相干信息，难以在发送端消除多用户之间的干扰，因此，此类方法更适合单用户JT。由于分布式MU-MIMO系统存在节点间的时频同步问题，直到5G的R19才开始研究Multi-TRP间相位相干信息的获取问题^[6]，使联合下行多用户预编码具备了可行性。

将分布式MU-MIMO技术拓展，增大协作节点的规模，形成大规模分布式MIMO，可以进一步提升系统性能。理论研究表明，随着节点部署密度和协作节点规模的增大，大规模分布式MIMO同样具有类似集中式mMIMO的信道“硬化”效果。当协作节点规模趋于无穷大，用户之间的信道具有统计正交性，此时，即使采用最大比发送（MRT）/最大比合并（MRC）仍可获得最优的性能^[7]。

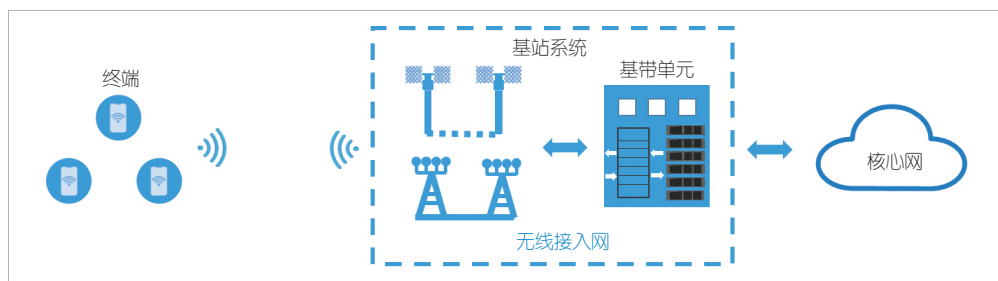
大规模分布式MU-MIMO的一种实现架构是全集中式，即所有参与协作的TRP采用前传网络（FH）连接到BBU，在BBU实现集中式协作传输。但是，当采用集中式处理时，考虑到前传网络的成本以及BBU的处理能力，这种方式不具备协作规模的扩展。文献[8]介绍了一种低复杂度的可扩展的大规模分布式MU-MIMO架构，其中TRP实现了全分布式的预编码/接收机。该分布式信号处理具有如下优点：1）由于多

用户检测和预编码以及信道参数获取均在TRP本地实现，其复杂性较低；2）采用前传网络后，集中式合并/分发易于云化和池化实现，系统整体的处理能力也易于可扩展；3）实际实现时，一个用户仅需要关联一定规模的TRP，一个TRP关联的用户数也有限，因此，即使系统中TRP和用户均趋于无穷，系统整体仍是可实现的，即系统具备可扩展。总的来说，采用可扩展的分布式协作信号处理方法，实现了全网的协作传输，具备打破传统蜂窝架构的能力，因此，学术界称之为CF-mMIMO^[9]。可扩展的CF-mMIMO也为持续提升新一代移动通信系统的性能提供了基础理论和技术支撑。

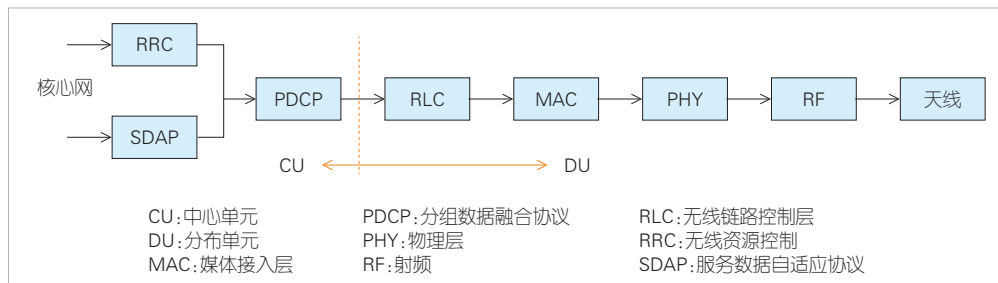
1.2 蜂窝移动通信系统与网络架构的演进

如图2所示，移动通信系统经过1G到5G的演进，基本上形成了用户终端（UE）和移动通信网络系统两大部分。其中，后者又包括无线接入网（RAN）和核心网两部分。

从网络架构的角度，当前5G新空口（NR）为了进一步提高灵活性，采用了3级架构，即分布单元（DU）-中心单元（CU）-核心网^[10]。DU主要包括实时性较强的物理层、媒体接入层（MAC）和无线链路控制层（RLC）。CU包括实时性要求较低的处理，如分组数据融合协议（PDCP）、服务数据自适应协议（SDAP）和无线资源控制（RRC）。DU和CU是逻辑上的划分，它们共同构成了无线接入网系统，通过基站（BS，3GPP称为gNodeB）实现。图3给出了5G无线接入网的关键功能单元^[10]。在5G系统中，每个CU可以连接1个或多个DU。CU和DU之间存在多种逻辑功能分割方案，可以适配不同的通信场景和不同的通信需求。



▲图2 5G移动通信系统的构成



▲图3 5G无线接入网关键功能

1.3 新型的无线接入网系统实现架构

无线接入网架构的创新是移动通信网络系统的研究热点。在移动通信系统演进的过程中,涌现出诸多新型的无线接入网实现架构,包括区块链无线接入网(B-RAN)^[11]、云无线接入网(C-RAN)^[12-13]、分布式RAN(D-RAN)、开放式无线接入网(O-RAN)^[14]、近域无线接入网(P-RAN)^[15]、CF-RAN^[16],以及在2024年世界移动通信大会成立的人工智能RAN(AI-RAN)等。当前,D-RAN采用BBU和射频拉远单元(RRU)的架构被广泛接受,但是由于BBU之间缺乏协作,系统性能和灵活性受到限制。C-RAN和O-RAN也是目前被广泛接受的RAN实现架构。

云化和虚拟化是无线接入网的发展趋势。CF-mMIMO的分布式协作信号处理是实现基带云化的关键途径,但是如何系统化实现“去蜂窝”还需要接入网架构的支撑。文献[16]提出了一种新型的全频谱无蜂窝无线接入网(CF-RAN),如图4所示。通过引入边缘分布式单元(EDU)汇聚多个TRP信号并完成分布式基带信号处理。以上行接收为例,检测出多个用户数据流后,EDU将其发送给以用户为中心的分布式单元(UCDU)。一个用户可以关联多个EDU,但是只能关联一个UCDU。在UCDU,可以将不同EDU发送过来的相同用户的数据流进行合并。对于下行传输,用户数据经UCDU分发至与之关联的EDU,在EDU实现本地的多用户预编码。由于EDU具备处理与频段相关的物理层信号的能力,而UCDU则仅需要关注高阶物理层(High-PHY),如调制解调和编解码等,因此该架构易于支撑高低频融合。

在CF-RAN的层2,可以使用准实时的无线智能控制器实现用户与TRP的关联,以及无线资源分配和多用户调度与配对等。为了实现无蜂窝系统的移动性,还需要一些非实时的集中化处理,这一部分协议栈可以在CU中实现。高级物理层以及层2和层3协议栈的实现,形成了虚化中心处理单元(vCPU)。

全频谱CF-RAN是在传统CoMP/Multi-TRP/分布式MIMO/分布式天线/C-RAN等技术基础上的进一步演进,可支撑6G关键能力指标的量级提升。下

面,我们将介绍CF-RAN的物理层CF-mMIMO传输关键技术、CF-mMIMO对6G关键能力的支撑及当前的研究进展,并给出一种CF-RAN的去蜂窝化协议栈设计。

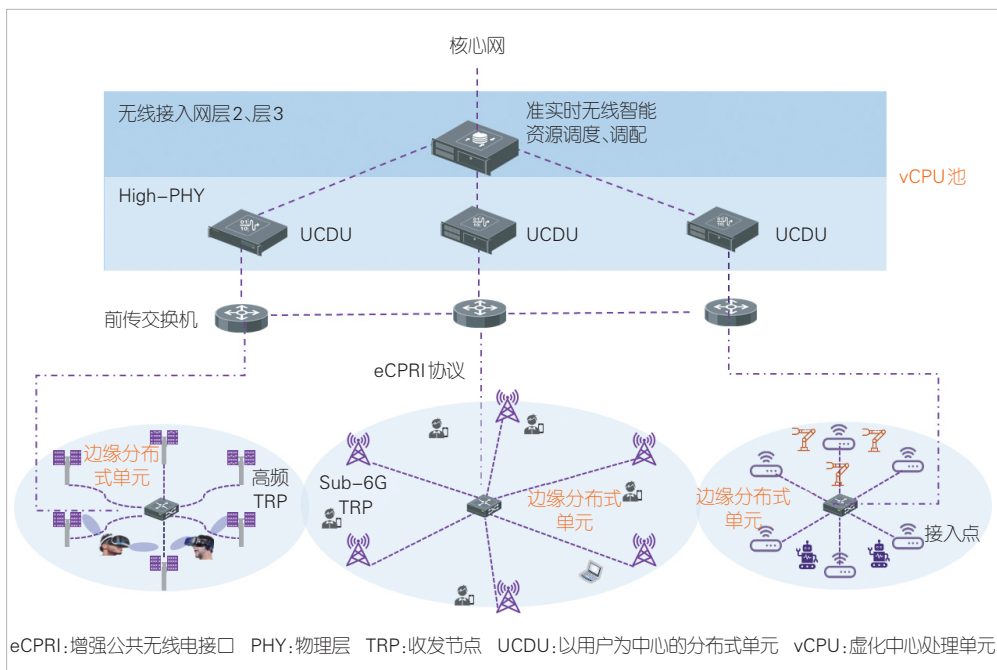
2 CF-mMIMO 传输关键技术

CF-mMIMO是提升频谱效率及峰值速率的关键技术。但是CF-mMIMO由于引入大规模分布式节点的协作传输,同样面临一些技术瓶颈,包括为了实现下行CJT面临的多节点之间的时频同步和互易性校准问题、下行CJT对相噪和互易性校准误差的鲁棒传输问题,以及上行分布式协作接收的复杂度与性能的权衡问题。

2.1 CF-mMIMO 节点间时频同步与互易性校准技术

在CF-RAN系统中,下行信道状态信息(CSI)的获取至关重要,也是多节点CJT技术的瓶颈。当系统工作在TDD模式下时,下行CSI常常根据上下行信道的互易性获得,即在相干时间内,空口的上下行信道是相同的。但是实际情况中,信道互易性会受到以下两种因素的影响:1)收发通道硬件电路的不同,导致空中信道与收发通道增益相乘之后的复合信道不再互易,这种影响可以通过互易性校准解决;2)网络侧节点间时频不同步,导致信道不互易,这需要通过网络侧的时频同步解决。

不同节点之间的时间差与系统的参考时间的获取方法有关。通常,如果节点均自由选择时间参考,节点之间是异步



▲图4 全频谱无蜂窝无线接入网示意图

的，必须有相应的同步机制以实现同步。例如文献[17]所考虑的Wi-Fi场景，节点之间采用空口同步机制，使得多个节点的时间对齐。如果每个节点独立地从GPS/Beidou中恢复时间，那么节点之间仍可能存在数十纳秒甚至上百纳秒的误差。由于各个节点独立恢复时间，时间的抖动也是需要考虑的一个问题。

节点之间的时钟同步同样影响CJT的实现。如果两个节点之间存在本振频偏，即使用户静止，用户到多个节点之间的信道由于频偏而随时间变化。节点的本振信号生成可以通过共本振时钟、共参考时钟、独立的本振3种方式实现。在实现CJT时，需要考虑节点之间时钟同步。

需要注意的是，互易性校准的过程本身也可以获得节点之间的时频同步。对于分布式部署，上下行互易性校准可以在网络侧通过自校准实现，即节点之间互发校准信号，估计节点的收发通道的互易性校准系数。为了实现大规模节点的相干协作传输，所有节点需要共相位参考，因此要求全网节点的校准。当节点规模较大时，需要研究如何以较低的实现复杂度，快速地实现全网校准。文献[18]采用遗传算法对RRU进行分组，尽可能地将邻近的RRU分别划分在不同的组中，以获得更好的校准性能。根据5G NR的动态时隙配置，文献[18]提出了一种特殊时隙配置的方法，从而实现RRU之间互相发送校准参考信号（CARS）。如图5所示，当RRU分组1特殊时隙的第5和第6个符号处于发送CARS时，RRU分组2处于保护周期（GP）和接收状态。同样地，当RRU分组2的第7和第8个符号处于发送CARS时，RRU分组1处于接收状态。两组RRU之间通过互相收发导频，从而估计出组间双向信道，最后再根据组间双向信道求解校准系数。一种总体最小二乘（TLS）法可以用来求解校准系数，但由于TLS算法涉及特征值分解，其复杂度是两组所有RRU天线数量之和的三次方量级。文献[18]提出一种基于Argos^[19]的低复杂度算法，能将校准系数的求解复杂度降低一个

量级。

节点之间的时频同步和上下行互易性校准还可以通过UE反馈实现。在5G R19的标准化过程中，产业界提出了UE辅助的校准。文献[6]提出了一种UE反馈的校准方法，其核心思想是基站利用未校准的上行信道对专用的下行CSI-RS进行预编码，终端根据该参考信号的信道估计得到校准系数。

总的来说，基站侧自校准可以获得较好的性能且无须标准化，在不考虑互操作的情况下，仅需要设备商各自实现。UE反馈校准则需要较多的标准化工作，受到节点间时频同步硬件实现的影响以及反馈开销，均需要详细的讨论。为了获得更好的相干传输性能，如何跟踪节点之间相位漂移同样需要进一步的研究。

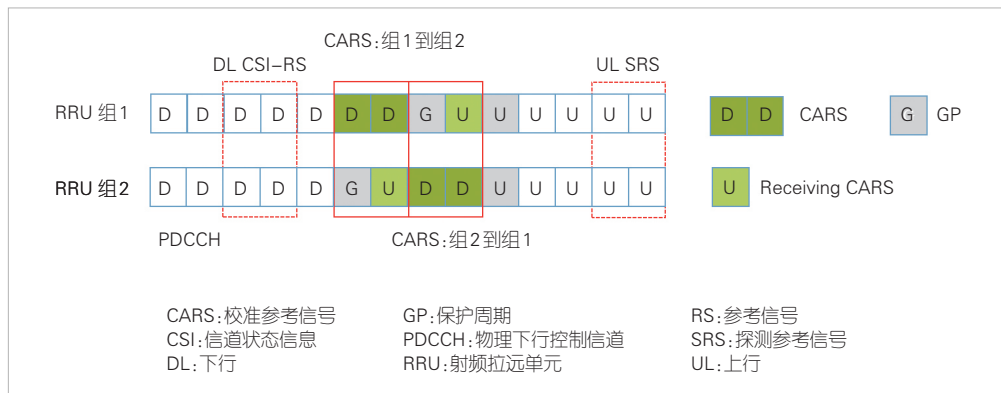
2.2 CF-mMIMO的鲁棒预编码技术

在CF-mMIMO系统的下行预编码中，相位噪声会对系统性能产生不可忽略的影响。相位噪声是一种乘性噪声，它的成因主要包括两个方面，即互易性校准误差和本振相位漂移。虽然采用互易性校准可以消除收发射频失配的影响^[19-21]，但是互易性校准的误差不可避免，且该误差通常建模为乘性噪声^[22]。此外，在CF-mMIMO中进行完美的时钟同步是困难的。即使信道是静态的，由于上行探测到下行预编码的延迟，且实际系统中多个节点之间不共本振的情况存在，振荡器的相位漂移现象是不可避免的^[23]。由于相位漂移是一个无法测量的随机变量，因此相位噪声的问题在实际CF-mMIMO的下行预编码传输中是一个关键问题。

在CF-mMIMO或其他分布式天线系统中，通常认为每个AP或基站拥有不同的独立相位噪声^[24-25]，最常见的建模方式是其相位满足一定范围的均匀分布或高斯分布。基于上述统计特性，可以对传统的集中式预编码方法进行增强，从而形成集中式鲁棒预编码方案。例如，基于信漏噪比（SLNR）^[26]的低复杂度的次优

鲁棒预编码，以及基于加权最小均方误差的（WMMSE）的鲁棒预编码方法^[27-28]。

在CF-RAN架构下，信道状态信息仅保存在EDU上，因此有必要研究分布式预编码方案。由于每个EDU仅能知道本地CSI的估计值，其他EDU上的CSI只能获得统计量等有限的知识，这相当于每个EDU只



▲图5 自校准参考信号配置

能获得对全局CSI的一个观测。此时,可以通过建立一个部分观测马尔可夫决策问题,决定每个节点采取的最优行动。文献[29]从预编码使得等效信道单位阵化的角度出发,设计了基于团队决策理论的分布式/多点协作预编码方案。然而,考虑到相位噪声的存在,还有必要进一步研究对相位噪声鲁棒的分布式预编码方法。文献[30]基于团队决策理论推导一种级联鲁棒分布式预编码。该预编码由三级预编码组成,其中第一层由EDU本地计算得到,第二层由EDU协作得到,最后一层则是通过CPU间的协作在CPU上计算得到。该方法可以看作是基于SLNR的鲁棒预编码的分布式实现,性能仍有优化的空间,需要研究人员提出更加行之有效的方案。

2.3 CF-mMIMO的分布式协作接收技术

CF-mMIMO的集中式接收机是将所有AP上的接收值都后传到CPU,由CPU进行集中处理。此外,CPU还需要一切接收均衡所需要的信息。然而,集中式接收机所面临的后传代价以及计算代价,会随着AP数量及每个AP的天线数量的提升从而变得不可接受。对于完全分布式接收,主要的问题则在于整体用户速率不高,尤其是信道状态良好的用户体验仍然不高。

文献[31-33]提出了一种两层接收机模型,即在AP和CPU两级进行了两次均衡合并,充分利用了分布式计算资源来提高上行的频谱效率。在AP端,每个AP仍然利用估计的本地信道状态信息自行均衡。均衡方法可以是局部(部分)最小均方误差(L(P)-MMSE),即AP在本地进行MMSE均衡。在CPU端则采用加权向量进行大尺度衰落解码(LSFD)合并^[31-33]。

在CF-mMIMO的部署中,有一种采用射频条带的后传链路结构实现方式,它用一条射频条带串联起所有的AP。这种部署方式可以大大节约后传链路网络的铺设代价。文献[34]和[35]在该结构的基础上发展的序列式接收,分别提出谢尔曼-莫里森-伍德伯里(SMW)接收机^[34]和序列MMSE接收机^[35]。它们的工作方式都是按照射频条带的链接顺序,每个AP利用本地信息和前一个AP传送的信息,均衡信号后,将均衡后的信号以及新的辅助信息传送给下一个AP。通过所有AP的接力,在CPU端的接收信号可以达到很好的乃至与集中式最优方法相同的性能。

LSFD、SMW和序列MMSE等方法可以实现分布式接收机,但是这些方法还不能实现理想的性能。LSFD方法与完全分布式相比有了显著提升,但是与集中式接收机相比还存在明显的性能鸿沟,而两种序列接收机都需要反馈一个相当于用户符号估计 K 倍的辅助信息(K 为用户数量)。这种后

传的代价在序列式的处理中很可能造成系统时延不满足实际需求。因此,有必要进一步研究分布式接收技术。文献[36]提出了一种基于新型无蜂窝网络结构的分布式接收机。该方法的性能接近集中式接收机,且EDU到CPU的后传代价可以只是静态信息,从而较好地平衡性能和系统代价。

以上所讨论的均是线性接收机,在未来的研究中,非线性的分布式接收机的研究也值得考虑。此外,对于上行功率控制,目前主要考虑的是固定平均用户功率方案。如何在CF-mMIMO中实现分布式功率控制也是一个有意义的研究方向。

3 CF-mMIMO技术支撑超大规模连接

大规模机器通信(mMTC)是6G关键应用场景之一。在网络中支持海量MTC设备(MTCD)的超大规模随机接入场景下,如何有效地估计信道、检测活跃用户和对应的数据消息逐渐成为了热点研究课题。这是因为,在超大规模接入场景中,系统的可接入的用户设备量极大,此时由于可用信道资源是有限的,以往基于正交资源分配的方案将造成极大的信令开销,限制设备的接入效率。因此,基于免授权的非正交多址(NOMA)被认为是未来mMTC场景的关键技术方案之一。CF-mMIMO以其分布式的天线与计算单元部署和可扩展特性,可实现低功耗超大规模连接。除此之外,各AP之间相互协作,可进一步提升系统的估计与检测能力。结合以上特性,以CF-mMIMO为支撑的超大规模连接具有广阔的应用前景。

当前已有学者对CF-mMIMO海量连接展开了研究。文献[37]将用户活跃性检测方法建模成一类最大似然检测问题,通过较低计算复杂度的坐标下降算法对用户的信道大尺度系数进行估计,当估计值超过给定阈值的时候,检测该用户为活跃状态;否则检测为非活跃状态。结论表明,CF-mMIMO网络能够支持更低功耗的mMTC设备,并且能够提供更为广域的覆盖范围。文献[38-39]研究了应用在CF-mMIMO的海量随机接入方案,可以解决活跃用户检测和信道估计问题。利用信道矩阵的结构稀疏特性,研究人员提出了一种基于结构稀疏的广义近似消息传递算法(SS-GAMP),可以实现可靠的联合活跃用户检测和信道估计。在SS-GAMP的基础上,还提出了一类基于串行干扰消除的联合活跃检测与信道估计策略。仿真结果表明,相比于已有的方法,所提的方案能够得到显著的性能优势。

尽管如此,当前CF-mMIMO系统下的超大规模连接方案仍存在一些挑战需要解决。首先,目前研究的相关内容主要假设各AP与所有用户关联,在用户设备数量特别大的情况下会带来较高的处理时延,同时也对分布式信号处理单元

的计算能力提出了较高的要求。如何实现设备的无限可扩展性,同时降低系统处理复杂度,是一个需要解决的难题。其次,高速移动的海量接入场景,例如车联网、无人机低空通信等在CF-mMIMO系统中的应用方案还缺乏相应的研究。这涉及AP服务关联和动态预测,以及海量设备所带来的超大维度信号检测与估计的难题,还需要后续开展更进一步的研究。除此之外,CF-mMIMO系统中常见的分布式天线接收时钟异步问题,会限制超大规模连接在实际系统中的性能表现。因此,如何解决异步问题,最小化产生的影响,需要研究人员提出更加行之有效的方案。

4 CF-mMIMO 技术支撑超可靠低延迟通信

传统的蜂窝式mMIMO作为5G的关键技术,满足一定条件下,通过增加天线数可以提供更大的分集增益,提高系统的传输速率和频谱效率。CF-mMIMO结构中消除了小区的概念,解决了小区间干扰和边缘服务不稳定的问题。接入点分散在不同位置上,距离用户更近。共享信道信息进行协作传输,不仅解决了高频信号易被遮挡的问题,还可以进一步提高频谱效率和链路的可靠性。文献[40]通过分析有限块长度下CF-mMIMO系统的传输错误(TE)概率和时间溢出(TO)概率来评估通信的可靠性和延迟。结果表明,通过速率选择、设备分组和空分复用,可以有效平衡系统的延迟和可靠性。

根据空时互换理论,牺牲大规模天线的空分复用增益,可以换取时延的降低和可靠性的提升。文献[3]研究了空时互换的编码技术,通过时-空二维编码,降低系统的时延,提升系统的可靠性。文献[41]对比了有限块长度下,时-空二维编码和时域编码的信道容量和色散。仿真结果表明,时-空二维编码可以通过增加空间自由度(DoF)有效减轻由短块长度引起的性能损失。然而,对于时域编码,每条空间链路独立编码,在任何空间DoF下,短块长度导致的性能损失将更为严重。这些结果表明,与时域编码相比,时-空二维编码能够更好地利用CF-mMIMO系统的空间维度优势,成为超可靠低延迟通信潜在的技术途径。

5 CF-mMIMO 技术支撑感知和通信融合

通信感知一体化(ISAC)通过在同一系统中共享硬件、频谱和信号等物理资源,可以以较低的成本在传递信息的同时,感知目标物体的方位、距离和速度等状态信息,并获得融合增益和协作增益。在CF-RAN架构下,分布式部署的多个节点可以通过协作方式进一步丰富测量以增强感知和定位的精度,从而提高服务的可用性和准确性。

文献[42]提出了一种协作式的ISAC框架,利用携带信息的正交频分复用(OFDM)信号,在无蜂窝MIMO系统下实现目标物体的定位,网络中包含了多个发送AP和多个目标物体。通过CPU共享系统信息,通信信号被重复用作感知参考信号。首先,接收AP根据目标物体反射的感知参考信号,提取出时延信息,进而测量目标物体引起的散射路径范围。然后,根据测量结果估算目标物体的位置。

文献[43]研究了无蜂窝MIMO系统中ISAC波束的设计问题,分别完成了通信优先准则下的感知波束设计、感知优先准则下的通信波束设计以及“最大-最小”公平性准则下的联合通信和感知波束设计。仿真结果表明,这种联合通信和感知波束设计可以在通信和感知性能上均取得较好的效果。

除了可以进一步增强感知和定位的精度,CF-RAN和ISAC结合还可以为构建更安全、更私密的无线网络环境提供了新的可能性。文献[44]研究了无蜂窝MIMO系统中ISAC安全空间信号的设计。其中,多个AP在给UE提供通信服务的同时,还需完成对窃听者的感知。为了提高系统对窃听者的鲁棒性,文献[44]在ISAC波形中包含了人工噪声(AN)以此降低窃听信道的质量。仿真结果表明,在无蜂窝MIMO系统架构下,可以通过调整AN的角域方向性有效地保证合法用户的通信安全。

网络化协作感知是无蜂窝无线接入网的优势,但是无蜂窝系统的协作感知也面临一些挑战。通常无蜂窝系统节点的天线数有限,单节点感知精度较差,多节点信号域的融合感知以及分布式感知融合均需要进一步研究。另外,感知如何辅助提升无蜂窝系统通信的性能也需要进一步研究。

6 CF-mMIMO 技术支撑泛在连接

得益于灵活的可扩展能力,CF-RAN架构被认为是支持广域覆盖和空地一体泛在接入的有效技术途径。对于分布式部署的CF-mMIMO系统,由于不同AP到不同UE的距离不同,对应的传播时延不同,从而导致网络无法做到所有AP对每个UE的发送信号在同一时刻到达。例如,接收机会跟先到达的发送信号进行同步,后到达的异步信号则会产生时延扩展差异(DSD)。考虑OFDM系统,对于室分系统等小范围场景,异步信号产生的符号间干扰(ISI)可以通过循环前缀(CP)削弱。在去除CP以及完成逆快速傅立叶变换(IFFT)之后,DSD会导致接收信号在解调过程中产生随子载波索引变化的相位旋转因子,这将对系统性能产生负面影响。文献[45]在5G NR协议框架下研究了2~4个资源块(RB)对应的宽带预编码算法,该方法可以有效对抗DSD导致的系统性能下降。

对于非地面网络（NTN）通信，例如面向卫星通信以及低空通信等大范围覆盖场景，多个AP到不同UE的时延差大于CP，此时将会产生异步干扰问题。除了DSD带来的接收信号相位旋转问题，异步干扰还会带来ISI、载波间干扰（ICI）以及多用户干扰（MUI）。文献[46]分析了CF-mMIMO系统中异步接收对上行可达速率的影响，结果表明相比于MRC接收机，性能更好的MMSE接收机对异步干扰更加敏感。文献[47]分析了大规模分布式MIMO系统中异步接收对下行用户速率的影响，结果表明大多数用户的下行单用户速率可能会降低约50%。因此，在系统设计过程中，非常有必要考虑异步干扰这一因素的影响。一种解决异步干扰的有效方法是将CF-mMIMO与mMIMO进行结合，利用mMIMO节点的空分能力和窄波束特性，采用波束调度以及主动同步^[48-49]，实现下行同步传输，并结合异步干扰抵消技术，提升上行传输的性能。未来，随着星间通信能力的提升，在星上实现分布式协作信号处理，可以解决地面终端发射功率不足的问题，因此也是实现手机直连卫星的一个关键技术途径。

7 基于人工智能和通信的融合的CF-RAN技术

现代通信网络日益复杂，需要管理大量的用户设备，满足多样化的服务需求。CF-RAN架构的引入进一步增加了网络设计的复杂性。AI技术，特别是深度学习和强化学习，已经在多个领域显示出强大的数据处理和模式识别能力。应用AI技术提高网络的自适应性、自动化水平和决策效率，可以在无线接入网的资源配置和网络维护与管理中发挥出重要的作用。

当前，AI在网络优化、无线资源管理以及网络数字孪生中的应用已受到广泛的关注^[50-51]。开放式无线接入网（O-RAN）提出了无线智能控制器（RIC）的概念，取代自组织网络（SON）和无线资源管理（RRM）的大部分功能，让RIC实现真正的无线资源控制。RIC不要求设备商开放RAN系统内部结构，只要求开

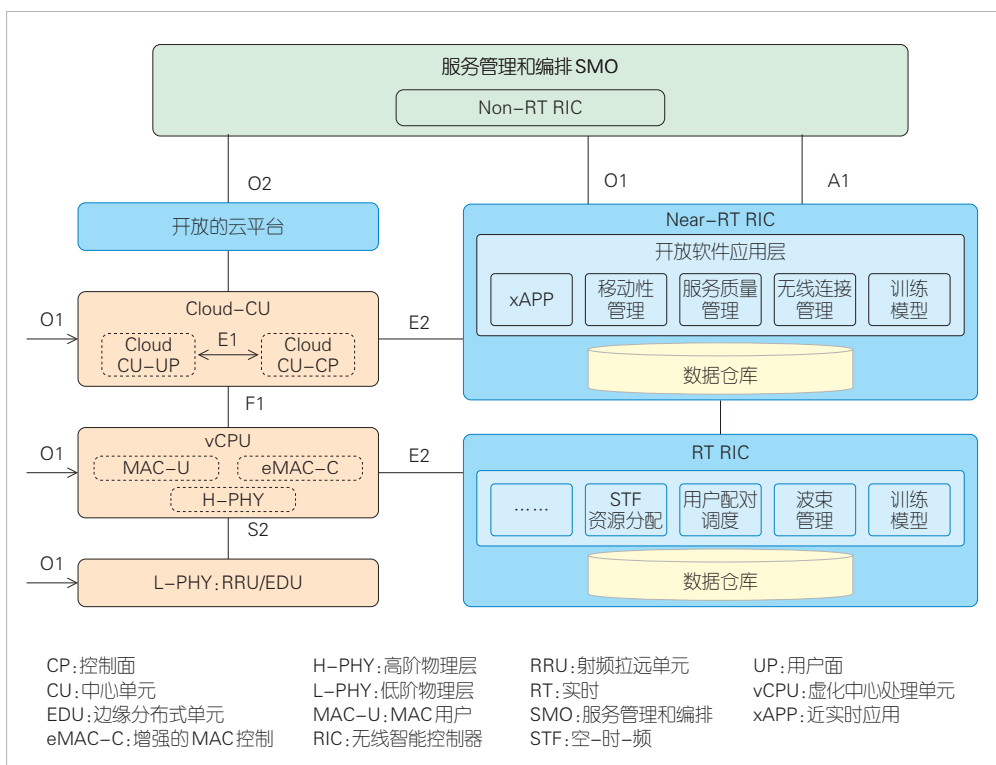
放接口，资源调度权限留给RAN设备商，从而保护设备商的利益并避免对现有RAN系统太多修改。根据开放的数据接口，可以将第三方的xAPP加入到RIC，从而带来极高的灵活性。这样的设计使得一些创新的想法可以得到快速验证，缩短新功能部署周期。

如图6所示，文献[51]在CF-RAN架构下提出了分级智能优化的架构，包括非实时智能控制（Non-RT RIC）、近实时部分（Near-RT RIC）和实时智能控制（RT-RIC）。通过新增的A1和E2接口，CF-RAN形成数据仓库，支撑分级智能的离线和在线训练。

从图6中可知，CF-RAN架构的管理包括了服务管理和编排（SMO）和Non-RT RIC功能，可实现秒级/百毫秒级的网络智能管理和运维，例如网络故障检测、RRU优化部署与管理、RAN分析、网络节能等，通常需要高维度海量数据支撑。SMO通过O1和O2接口实现Cloud-CU、vCPU、EDU/RRU、Non-RT RIC等的管理。

Near-RT RIC可以实现网络区域级的智能，包括网络负载均衡、干扰管理、移动性管理、多关联的管理、QoS管理等。这种区域级的智能，通常要求时延在数十毫秒级，但是实时性要求相对较低。

RT-RIC可以实现UCDU中的智能控制，包括空-时-频（STF）资源分配、用户配对和调度、波束管理等实时性要



▲图6 无蜂窝无线接入网(CF-RAN)的RIC实现架构

求较高的功能。RT-RIC需要层1和层2的数据支撑。

8 CF-RAN上层协议栈设计

8.1 新型CF-RAN的vCPU实现架构

图7所示给出了CF-RAN的实现架构。EDU与一个或多个RRU连接，EDU与RRU之间的连接关系是静态的。当EDU与一个RRU连接时，EDU的功能可内置于RRU中，即为传统的全分布式实现的CF-mMIMO。当RRU和EDU分离实现时，两者之间的接口可以采用传统的Option 8公共无线电接口（CPRI）接口或者O-RAN的Option 7-2a的增强公共无线电接口（eCPRI）接口。RRU实现各频段信号的收发，EDU实现低阶物理层（L-PHY），包括空-时-频解耦合。由于EDU和UCDU采用可扩展的分布式协作信号处理，可以实现物理层的云化和池化。

为了实现用户的移动性和大范围组网，需要实现高层控制的云化，相应地，还需要研究RAN的层2（L2）和层3（L3）的可扩展实现。另外，以用户为中心的CF-RAN对可扩展的MAC层多用户资源调度也提出了新的挑战。充分利

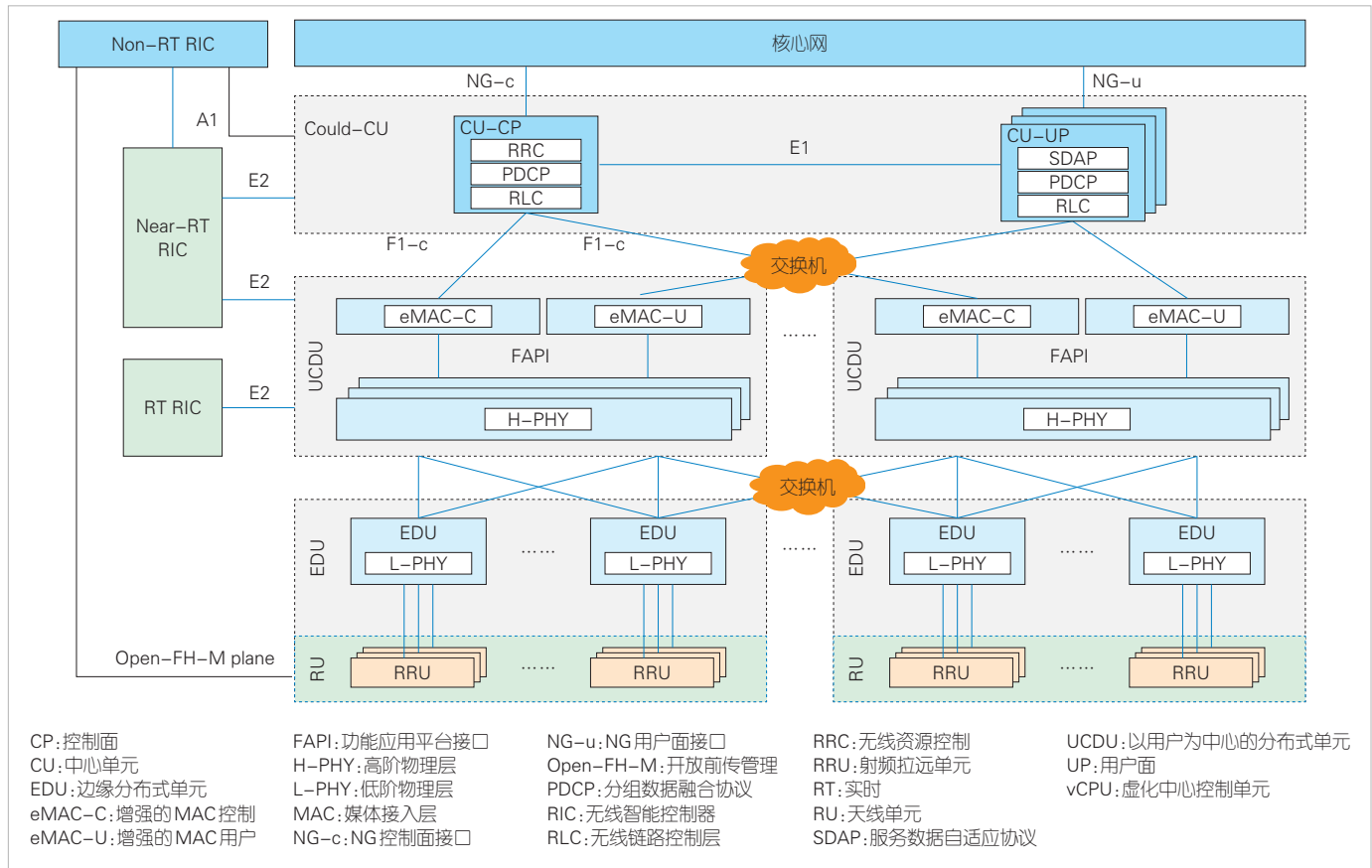
用终端与多节点的统计信道信息，结合AI技术，可以有效解决这些问题。

如图7所示，结合RIC技术，我们提出了以用户为中心的CF-RAN的vCPU实现及上层协议栈设计架构。vCPU与EDU之间采用eCPRI协议，可以采用普通的交换机连接。vCPU包括多个UCDU和Cloud CU两部分。

UCDU包括高阶物理层（H-PHY）和MAC层。H-PHY实现与EDU的接口，实现分布式协作基带处理。H-PHY与MAC层之间采用功能应用平台接口（FAPI）接口。UCDU的协议栈实现也分为控制面和用户面。MAC层的实现包括增强的MAC控制（eMAC-C）面和用户（MAC-U）面。eMAC-C实现以用户为中心的关联、配对、调度及资源分配。

CU和UCDU之间采用F1接口。为了实现可扩展的实现以及CU的云化，CU也分为用户面（CU-UP）和控制面（CU-CP）。CU-CP包括RLC、PDCP和RRC，CU-UP包括RLC、PDCP和SDAP。

采用AI可以显著提升RAN的无线资源的管理以及网络部署和优化的性能，也可以实现更好的运营。我们采用普适分级智能（PML）的RIC架构^[51]，包括实时RIC（RT-RIC）、



▲图7 无蜂窝无线接入网(CF-RAN)的vCPU实现及协议栈设计

近实时 RIC (Near RT-RIC)^[52] 和非实时 RIC (Non RT-RIC)。RT-RIC 和 Near RT-RIC 通过 E2 接口与 UCDU 和 Cloud-CU 进行交互^[53]。Non-RT-RIC 通过 A1 接口与 Cloud-CU 进行交互。Non-RT-RIC 与 RRU 之间通过管理面消息进行配置和管理^[54]。

8.2 CF-RAN 与移动性: 用户无感 UCDU 关联

在 CF-RAN 系统中, 当用户发生移动时, 为支持蜂窝协作传输, 需要在 UCDU 之间完成实时的 RRU 动态关联。每个 UCDU 都配置与之关联的 RRU 集合 Ω_{RRU}^{UCDU} 。如图 7 所示, EDU 与 UCDU 之间可采用交换机连接, 不同 UCDU 的 Ω_{RRU}^{UCDU} 有重叠。

在 Cloud-CU, RRC 模块根据 SRS 的接收信号, 测量出用户到各 RRU 的信噪比及到达时间, 可感知到服务用户的位置的变化, 进而更新 RRC 模块维持用户关联的 RRU 集合 Ω_{RRU}^{RRC} 。一种简单的方法是, 当主服务的 eMAC-C 实体所在的 UCDU 连接的 RRU 在 Ω_{RRU}^{RRC} 集合中的数量小于该集合中其他 UCDU 所连接的 RRU, 并保持一定的时间后, Cloud-CU 的 RRC 模块通知源 eMAC-C 停止该用户的上下行调度, 转而由目标 eMAC-C 继续调度该用户。另一种方法是, Cloud-CU 根据 eMAC-C 上报的与用户实际收发数据业务的 RRU 集合 Ω_{RRU}^{MAC} , 当主服务的 eMAC-C 实体所在的 UCDU 连接的 RRU 在该集合中的数量小于该集合中其他 UCDU 所连接的 RRU, 并保持一定的时间后, Cloud-CU 的 RRC 模块通知源 eMAC-C 停止该用户的上下行调度, 转而由目标 eMAC-C 继续调度该用户。

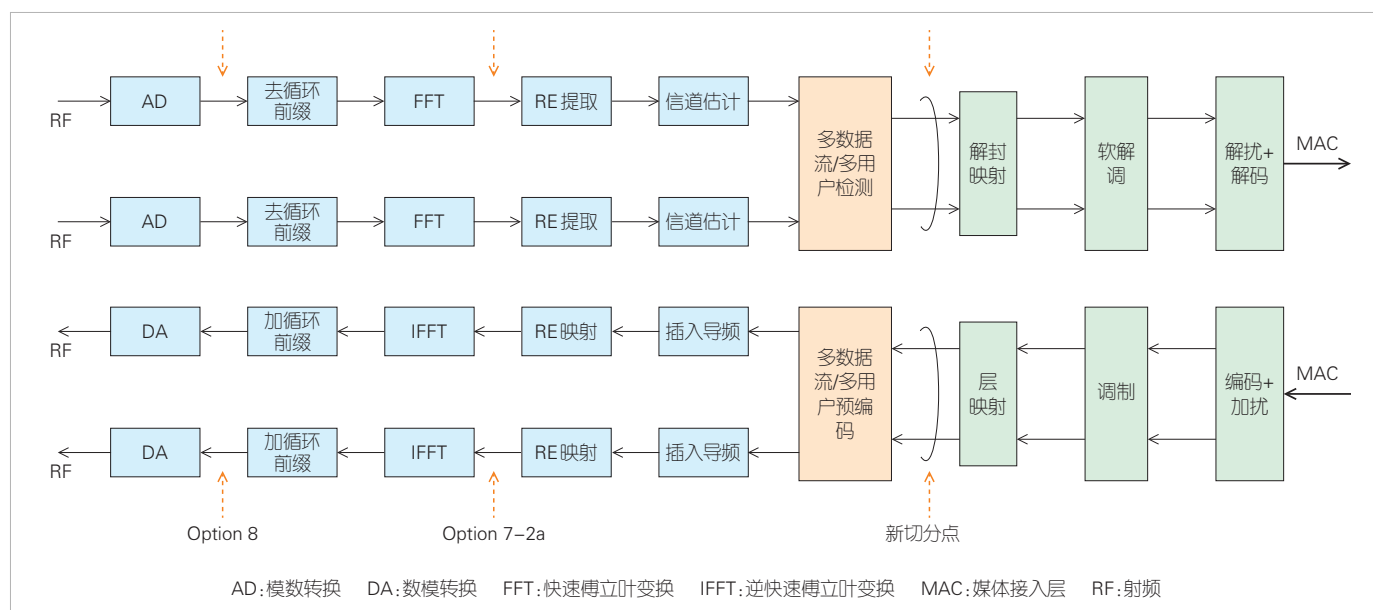
可扩展的蜂窝大规模 MIMO 系统中, 大规模节点可以

被视为一个小区, 因此协议栈需要将这些节点视为空域资源, 由 MAC 层调度实现用户与节点的动态关联。但是在大规模覆盖时, 仍需要单个小区的基站支持多个 eMAC-C 模块。因此, Cloud-CU 需要在上层实现对各个 UCDU 所服务的用户进行管理。当前 5G NR 及演进标准制定了比较完善的波束域接入、切换和恢复等机制, 这些机制与蜂窝系统大规模节点协作有相通之处。由此可见, 在协议栈设计方面, 也可以借鉴相关方法。

8.3 CF-RAN 与互操作性: 新型物理层切分方式

由于采用分布式协作传输, CF-RAN 物理层的信号处理下沉到 RRU 或 EDU, 因此, 需要设计新型的前传接口。图 8 给出了 O-RAN 常用的切分接口和新型的切分接口^[54]。O-RAN 的 Option 7-2a 定义在 FFT/IFFT。

蜂窝系统的基带处理需要将上行多用户检测和下行多用户预编码下沉到 RRU 或 EDU。因此, 可以将低阶的物理层在 RRU/EDU 实现, 而高阶物理层在云化的 UCDU 实现。如图 8 所示, EDU 与 UCDU 之间的功能切分在数据流层面^[6]。数据流可以是在相同时频资源上传输的空间域数据流, 也可以是采用正交时频资源分配的用户数据流。对于上行接收链路, 数据流是指检测器输出的多个用户的数据流或单个用户的多个数据流; 对于下行发送链路, 数据流是指基站待发送的在相同时频资源上多个用户/或单个用户的数据流。在 O-RAN 的 Option 7-2a 的 eCPRI 基础上进一步增强, 可以实现新型的前传。



▲图8 开放无线接入网(O-RAN)常用的切分接口和新型的切分接口

9 结束语

CF-RAN是一种新型的网络架构,打破了传统蜂窝网络小区的概念,通过分布式协作的方式为用户设备提供无缝的覆盖,减少了信号盲区,提升了用户体验。利用上行分布式接收和下行相干联合传输技术,无蜂窝大规模MIMO可以有效提升系统的频谱效率,并结合通感融合、AI等技术成为支撑6G典型应用场景和关键技术指标的有效技术途径。但需要看到,CF-RAN及CF-mMIMO仍有一些理论和技术瓶颈问题需要进一步研究,并通过试验验证其可实现性。

参考文献

- [1] 3GPP. The next wave of 5G - 3GPP release 19 [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/12/3gpp-release-19>
- [2] YOU X H. 6G extreme connectivity via exploring spatiotemporal exchangeability [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130306. DOI: 10.1007/s11432-022-3598-4
- [3] YOU X H, ZHANG C, SHENG B, et al. Spatiotemporal 2-D channel coding for very low latency reliable MIMO transmission [C]// Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2022: 473-479. DOI: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008621
- [4] WANG D M, WANG J Z, YOU X H, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(10): 2112-2127. DOI: 10.1109/JSAC.2013.131012
- [5] YOU X H, WANG D M, WANG J Z. Distributed MIMO and cell-free mobile communication [M]. Singapore: Springer, 2021
- [6] Qualcomm. CSI enhancements for up to 128 ports and UE-assisted CJT with non-ideal TRP synchronization [R]. 2024
- [7] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(3): 1834-1850. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655515
- [8] 王东明. 面向6G的无蜂窝大规模MIMO无线传输技术 [J]. 移动通信, 2021, 45(4): 9-15
- [9] NAYEBI E, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Cell-free massive MIMO systems [C]//Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2015: 695-699. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421222
- [10] NGMN Alliance. 5G RAN CU-DU network architecture, transport options and dimensioning [R]. 2019
- [11] LING X T, WANG J H, BOUCHOUCHA T, et al. Blockchain radio access network (B-RAN): towards decentralized secure radio access paradigm [J]. IEEE access, 2019, 7: 9714-9723. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890557
- [12] China Mobile Research Institute. C-RAN: the road towards green RAN[R]. 2010
- [13] PAN C H, ELKASHLAN M, WANG J Z, et al. User-centric C-RAN architecture for ultra-dense 5G networks: challenges and methodologies [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(6): 14-20. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700483
- [14] O-RAN Fronthaul Working Group. Control, user and synchronization plane specification [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.o-ran.org/specifications>, 2020.
- [15] BI Q. The proximity radio access network for 5G and 6G [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 67-73. DOI: 10.1109/MCOM.001.21494
- [16] WANG D M, YOU X H, HUANG Y M, et al. Full-spectrum cell-free RAN for 6G systems: system design and experimental results [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130305. DOI: 10.1007/s11432-022-3664-x
- [17] HAMED E, RAHUL H, ABDELGHANY M A, et al. Real-time distributed MIMO systems [C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. ACM, 2016: 412 - 425.. DOI: 10.1145/2934872.2934905
- [18] CAO Y, WANG P, ZHENG K, et al. Experimental performance evaluation of cell-free massive MIMO systems using COTS RRU with OTA reciprocity calibration and phase synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1620-1634. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3276057
- [19] SHEPARD C, YU H, ANAND N, et al. Argos: practical many-antenna base stations [C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2012: 53-64.. DOI: 10.1145/2348543.2348553
- [20] XU S, CAO Y, LI C G, et al. Spanning tree method for over-the-air channel calibration in 6G cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(8): 5567-5582. DOI: 10.1109/TWC.2023.3235355
- [21] PAPADOPOULOS H, BURSALIOGLU O Y, CAIRE G. Avalanche: fast RF calibration of massive arrays [C]//Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2014: 607-611. DOI: 10.1109/GlobalSIP.2014.7032189
- [22] CAO Y, LIANG X H, WANG X N, et al. Performance of cell-free massive MIMO under imperfect channel state information and reciprocity calibration [J]. IEEE systems journal, 2023, 17(3): 4383-4394. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3269145
- [23] FANG Y, QIU L, LIANG X W, et al. Cell-free massive MIMO systems with oscillator phase noise: performance analysis and power control [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(10): 10048-10064. DOI: 10.1109/TVT.2021.3100862
- [24] YOU L, LIU A, WANG W J, et al. Outage constrained robust multigroup multicast beamforming for multi-beam satellite communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2019, 8(2): 352-355. DOI: 10.1109/LWC.2018.2872710
- [25] YAN Y, AN K, ZHANG B N, et al. Outage-constrained robust multigroup multicast beamforming for satellite-based Internet of Things coexisting with terrestrial networks [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(10): 8159-8172. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3042831
- [26] SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2007, 6(5): 1711-1721. DOI: 10.1109/TWC.2007.360373
- [27] HAN S Q, YANG C Y, WANG G, et al. Coordinated multi-point transmission strategies for TDD systems with non-ideal channel reciprocity [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(10): 4256-4270. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.090313.120667
- [28] SHI Q J, RAZAVIYAYN M, LUO Z Q, et al. An iteratively weighted MMSE approach to distributed sum-utility maximization for a MIMO interfering broadcast channel [J]. IEEE transactions on signal processing, 2011, 59(9): 4331-4340. DOI: 10.1109/TSP.2011.2147784
- [29] MIRETTI L, BJÖRNSON E, GESBERT D. Team MMSE precoding with applications to cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(8): 6242-6255. DOI: 10.1109/TWC.2022.3147895
- [30] HONG Z Y, XU S, LI T, et al. Robust cascaded team MMSE precoding for cell-free distributed downlink under hierarchical fronthaul [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, PP(99): 1. DOI: 10.1109/TWC.2024.3416296
- [31] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 77-

90. DOI: 10.1109/TWC.2019.2941478
- [32] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Scalable cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4247–4261. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2987311
- [33] ZHANG J Y, ZHANG J, BJÖRNSON E, et al. Local partial zero-forcing combining for cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(12): 8459–8473. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3110214
- [34] VAN ROMPAEY R, MOONEN M. Scalable and distributed MMSE algorithms for uplink receive combining in cell-free massive MIMO systems [C]//Proceedings of ICASSP 2021 – 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2021: 4445–4449. DOI: 10.1109/ICASSP39728.2021.9414456
- [35] SHAIK Z H, BJÖRNSON E, LARSSON E G. MMSE-optimal sequential processing for cell-free massive MIMO with radio stripes [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7775–7789. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3100619
- [36] HONG Z Y, LI T, LI C G, et al. Group-joint MMSE complementary based distributed uplink for cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, PP(99): 1. DOI: 10.1109/TWC.2024.3403541
- [37] GANESAN U K, BJÖRNSON E, LARSSON E G. An algorithm for grant-free random access in cell-free massive MIMO [C]//Proceedings of IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9154288
- [38] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Massive access in cell-free massive MIMO-based Internet of Things: cloud computing and edge computing paradigms [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2021, 39(3): 756–772. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3018807
- [39] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Compressive sensing-based adaptive active user detection and channel estimation: massive access meets massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 764–779. DOI: 10.1109/TSP.2020.2967175
- [40] ZHANG Z Y, YOU X H, WANG D M, et al. Performance of multidevice downlink cell-free system under finite blocklength for uRLLC with hard deadlines [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(7): 2090–2106. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3280962
- [41] YE F, YOU X H, LI J M, et al. Explicit performance bound of finite blocklength coded MIMO: time-domain versus spatiotemporal channel coding [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2406.13922>
- [42] ZHANG Z K, REN H, PAN C H, et al. Target localization and performance trade-offs in cooperative ISAC systems: a scheme based on 5G NR OFDM signals [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2403.02028>
- [43] DEMIRHAN U, ALKHATEEB A. Cell-free ISAC MIMO systems: joint sensing and communication beamforming [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2301.11328>
- [44] RIVETTI S, BJÖRNSON E, SKOGLUND M. Secure spatial signal design for ISAC in a cell-free MIMO network [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2024: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10570706
- [45] GUO Y X, FAN Z Q, LU A, et al. Downlink transmission and channel estimation for cell-free massive MIMO-OFDM with DSDs [J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2022, 2022(1): 17. DOI: 10.1186/s13634-022-00847-6
- [46] YAN H S, LU I T. Asynchronous reception effects on distributed massive MIMO-OFDM system [J]. IEEE transactions on communications, 2019, 67(7): 4782–4794. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2908401
- [47] LI G Y, WU S C, YOU C S, et al. Cell-free massive MIMO-OFDM: asynchronous reception and performance analysis [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(7): 11894–11906. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3333532
- [48] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for millimeter-wave/terahertz massive MIMO transmission with per-beam synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1550–1563. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699100
- [49] YOU L, CHEN X, SONG X H, et al. Network massive MIMO transmission over millimeter-wave and terahertz bands: mobility enhancement and blockage mitigation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(12): 2946–2960. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3005493
- [50] TAO Z, GUO Y, HE G, et al. Deep learning-based modeling of 5G core control plane for 5G network digital twin [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv:2302.06980v1>
- [51] 6GANA. From cloud AI to network AI: a view from 6GANA [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.6g-ana.com>
- [52] YOU X H, HUANG Y M, LIU S H, et al. Toward 6G T_Kμ extreme connectivity: architecture, key technologies and experiments [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(3): 86–95. DOI: 10.1109/MWC.004.2200482
- [53] O-RAN Working Group 3. Near-real-time RAN intelligent controller near-RT RIC architecture [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.O-RAN.org/specifications>
- [54] O-RAN Working Group 3. Near-real-time RAN intelligent controller, E2 application protocol (E2AP) [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.O-RAN.org/specifications>

作者简介



吴越, 紫金山实验室在站博士后; 主要研究领域为未来移动通信系统和无线传输技术研究; 已发表论文5篇, 申请专利10项。



王东明, 东南大学特聘教授、博士生导师, 工信部 IMT-2030 (6G) 技术推进组专家组副组长; 作为项目负责人, 承担了国家科技重点研发计划项目重点专项“6G无线空口传输技术”; 获2016年度国家科技进步奖特等奖和2014年江苏省科学技术奖一等奖; 已发表学术论文200余篇, 申请和授权中国与国际发明专利50余项。



尤肖虎, 中国科学院院士、东南大学教授、紫金山实验室首席科学家; 目前主要研究方向为无线与移动通信系统、现代数字信号处理等; 作为项目负责人, 曾承担30余项国家“863”、科技攻关、国家自然科学基金等项目。