

资源小区——面向下一代超密集网络的无线覆盖结构

张夏雨¹, 李建东^{1,2}, 刘俊宇¹, 盛敏¹, 史琰¹, 解子文¹

(1. 西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 随着移动用户对高速数据传输业务的需求不断增加, 移动通信系统在局部区域容量覆盖能力不足的问题日益显著。为了消除容量覆盖空洞, 克服网络的复杂干扰, 提出了资源小区覆盖结构。该覆盖结构具有弹性可扩展、高效按需覆盖的特点, 以干扰管控为基础, 形成面向容量覆盖和能量覆盖的基本空间单元, 实现业务分布、能量分布与覆盖结构的相互适配。依托上述覆盖结构, 进一步研究了面向容量覆盖的资源小区生成方法, 通过宏观上覆盖结构的动态调整以及网络资源随业务变化的按需高效流转, 实现了均匀的接入点部署结构对非均匀业务分布的高效覆盖。仿真和实测结果表明, 相比于传统静态覆盖方法, 所提资源小区的生成方法消除了容量覆盖空洞, 提高了整网的峰值传输速率, 有效提升了网络的容量覆盖能力。

关键词: 资源小区; 超密集网络; 容量覆盖; 能量覆盖

中图分类号: TN915.65

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00336

Resource cell-wireless coverage structure for next-generation ultra-dense networks

ZHANG Xiayu¹, LI Jiandong^{1,2}, LIU Junyu¹, SHENG Min¹, SHI Yan¹, XIE Ziwen¹

1. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: With the increasing demand of mobile users for high-speed data transmission services, the problem of insufficient capacity coverage of mobile communication systems in local areas is becoming increasingly prominent. Aiming to eliminate the capacity coverage hole and overcome the complex interference of the network, the resource cell coverage structure was proposed. The coverage structure has the characteristics of elastic scalability and is capable of providing on-demand energy-efficient coverage. Based on the interference management, a basic spatial unit for capacity coverage and energy coverage was formed, and the mutual adaptation of service distribution, energy distribution and coverage structure were realized. Relying on the above coverage structure, a resource cell generation (RCG) method was proposed to enhance capacity coverage. Through dynamically adjusting the coverage structure and providing on-demand network resources, the RCG method could achieve efficient capacity coverage for the uneven service distribution under uniform access point deployment. Simulation and experimental results show that, compared with the traditional static coverage method, the RCG method eliminates the capacity coverage hole, improves the network throughput, and enhances the capacity coverage capability of the network.

Key words: resource cell, ultra-dense network, capacity coverage, energy coverage

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2023-02-01

通信作者: 李建东, jdli@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2020YFB1807001); 国家自然科学基金资助项目 (No.62121001, No.62171344, No.61931005); 中国科协青年人才托举工程; 陕西省重点产业创新链项目 (No.2022ZDLGY05-01, No.2022ZDLGY05-06); 陕西省重点研发计划 (No.2021KWZ-05); 鹏城实验室重点项目 (No.PCL2021A15)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1807001), The National Natural Science Foundation of China (No.62121001, No.62171344, No. 61931005), The Young Elite Scientists Sponsorship Program of CAST, The Key Industry Innovation Chain of Shaanxi (No.2022ZDLGY05-01, 2022ZDLGY05-06), The Key Research and Development Program of Shaanxi (No.2021KWZ-05), The Major Key Project of PCL (No.PCL2021A15)

0 引言

在“万物互联，数字孪生，智能泛在”^[1]的驱动下，6G 将支持各类数字化、智能化、虚拟化场景，如全息通信、智慧交互、数字孪生、沉浸式云 XR 等大速率、大容量、超密集型业务，即超高数据密度（uHDD, ultra-high data density）类业务^[2]。相比于 5G，预计 6G 超高数据密度类业务的下行峰值传输速率将由 20 Gbit/s 增长至 1 Tbit/s，流量密度将提升 10~1 000 倍，每平方千米连接数增大到原来的 100~10 000 倍^[3-4]。为满足用户极致的数据体验，在由分布单元（DU, distributed unit）、集中单元（CU, centralized unit）与核心网构成的 5G 三级网络结构的基础上，创新演进更多的无线覆盖结构，例如，采用 DU 与 CU 分离并将 CU 云化的 5G 云无线电接入网（C-RAN, cloud-radio access network）覆盖结构，将大量计算资源下沉至边缘节点的雾无线电接入网（Fog-RAN, fog-radio access network）覆盖结构，以及基于分布式天线系统（DAS, distributed antenna system）和协同多点（CoMP, coordinated multiple point）传输技术的无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构等。然而，在超高数据密度类业务场景中，业务的时空分布动态变化，上述覆盖结构由于缺乏适配动态业务的灵活性，将导致网络中有限的资源在复用的过程中发生冲突，使网络干扰不断恶化，降低局部区域内的网络容量，从而产生容量覆盖空洞。因此，如何构建灵活可重构的网络覆盖结构，克服网络中的复杂干扰，缓解资源的使用冲突，实现无线资源的按需高效流转，消除容量覆盖空洞，是超密集网络亟须解决的关键问题。

IMT-2030（6G）推进组在《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[1]中指出，为实现 6G 全新业务场景，下一代网络覆盖结构应具备集中和分布协同的去中心化分级架构，统一化、智能化、简单化的网络单元，网络拥有自组织、自演进、自适应的能力。特别地，对于超高数据密度类业务场景中超大的峰值传输速率、极高的传输容量以及不均匀的数据速率需求，无线网络覆盖结构应该具备弹性覆盖、可扩展性以及绿色节能的特点，具体如下。

1) 弹性覆盖

弹性覆盖具有两层含义：从宏观层面出发，网络能够实现柔性覆盖^[5]，例如，基站间相互协作方式的调整、节点间组网方式的改变等；从微观层面

出发，基站能够对无线资源进行按需配置与管理，例如，通过调整天线的倾角和扇形避免相邻小区的干扰，为不同的用户分配不同的频率资源等。

2) 可扩展性

可扩展性^[6]是指随着蜂窝网络的密集化部署与用户的业务激增，网络中的各种协议、算法的计算量不会随着网络规模的扩大以及节点数量的增加而无限增加。同时，受制于用户业务对低时延、高可靠的要求，网络的开销也不能随着网络规模的扩大而无限增大。覆盖结构满足低复杂度以及低信息交互量的要求。

3) 绿色节能

网络中的业务会随着时间的推移发生有规律的变化，这种现象被称为业务的“潮汐”现象，例如，在白天，办公区/商业区的人流量多，设备连接密度大，业务的需求量高，而住宅区则与之相反；在傍晚，住宅区的人口密度大，业务需求量大，而办公区/商业区的业务流量小。针对“潮汐”现象，可通过基站与载波的自主休眠，覆盖结构在能够保障服务能力与用户体验速率的同时减少网络的能耗，有效实现绿色高效通信。

本文针对上述超高数据密度类业务的分布特征以及未来无线通信网络覆盖结构的新范式，提出了面向下一代超密集网络的无线覆盖结构——资源小区，并针对超高数据密度类业务场景，设计了面向容量覆盖的资源小区生成方法。

1) 资源小区覆盖结构

资源小区的核心思想在于通过网络供给侧资源的动态调整，实现业务分布、能量分布与覆盖结构的相互适配。具体而言，资源小区从宏观上通过动态调整基站间协同传输方式，使覆盖结构随业务变化动态调整，消除网络中的容量覆盖空洞；从微观上采用分布式资源管控的理念，根据用户需求与信道状态信息精准分配通信资源，实现超密集网络下极致的干扰管控。资源小区具备容量覆盖模式与能量覆盖模式两种工作模式。容量覆盖模式可形成面向容量覆盖的基本空间单元，通过平衡由多小区联合传输带来的分集增益以及复用空间内有限的频率资源所带来的复用增益，提升网络的容量覆盖能力；能量覆盖模式可形成面向能量覆盖的基本空间单元，在保障用户服务质量的基础上，通过载波级的休眠与基站级的休眠降低整网能耗，实现绿色高效通信。

2) 面向容量覆盖的资源小区生成方法

该方法通过宏观上覆盖结构的动态调整以及网络资源随业务变化的按需高效流转，实现了利用均匀的接入点部署结构对非均匀业务的高效容量覆盖。为了验证该方法的有效性，在西安电子科技大学远望谷体育馆搭建实测平台，测试结果表明，相比于传统均匀覆盖结构，资源小区弹性覆盖结构消除了容量覆盖空洞，倍增了整网的下行峰值传输速率，有效地提升了网络的容量覆盖能力。

1 现有无线网络覆盖结构

移动通信系统的发展伴随着覆盖结构的革新，目前在 5G 移动通信系统中存在以下 4 类典型的覆盖结构：微蜂窝网络覆盖结构、C-RAN 覆盖结构、Fog-RAN 覆盖结构以及无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构。以上 4 种覆盖结构有效提升了 5G 网络的覆盖能力。本节分别介绍了 4 种覆盖结构的概念及基本特点，并指出上述覆盖结构在面对超高数据密度类业务场景时所需克服的难题与挑战。

1.1 微蜂窝网络覆盖结构

微蜂窝^[7]由宏蜂窝演进而来，传统宏蜂窝同构网络已经无法满足用户对系统容量的需求，因此密集地部署微蜂窝基站，降低用户与基站间的路径损耗成为一种高效且低成本的运营方式。相比于宏蜂窝基站，微蜂窝基站的不同之处在于：发射功率小，一般不超过 10 W；覆盖半径小，约为 10~300 m；应用场景小，多部署于室内中小面积区域与室外宏基站无法覆盖的小面积区域。宏微结合的覆盖结构如图 1 所示。

在 4G LTE 和 5G 网络中，考虑微蜂窝基站发射功率小、覆盖半径小的特点，一部分微蜂窝基站被部署于宏蜂窝基站无法覆盖的区域，为宏小区的边界用户提供数据传输服务，一部分微蜂窝基站被部署于宏基站所覆盖的热点区域，缓解宏基站的服务压力，还有一部分微蜂窝基站被大量密集部署，通过缩短基站到终端设备之间的距离提升链路的信噪比，实现容量覆盖增强。基于宏微结合的异构蜂窝网络，Zhou 等^[8]在 2016 年提出“超蜂窝 (hyper-cellular)”覆盖结构，该结构创新性地采用数据面与控制面分离的设计，其中宏蜂窝基站提供控制面支持，微蜂窝基站提供数据面支持，由于微蜂窝基站的选址和部署具有高度的灵活性，因此网络结构可针对用户业务需求实现柔性覆盖，进而增强容量覆盖能力。

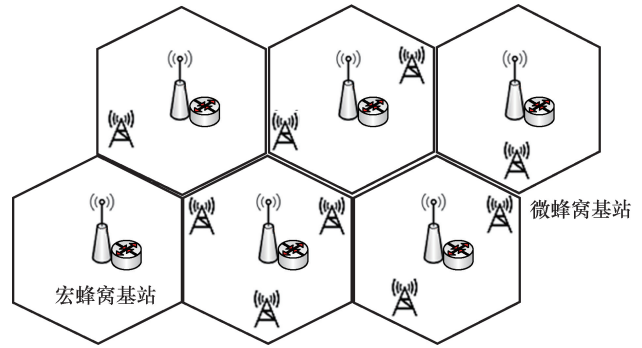


图 1 宏微结合的覆盖结构

1.2 C-RAN 覆盖结构

C-RAN 覆盖结构^[9-10]由中国移动在 2009 年提出，4G C-RAN 覆盖结构与传统的一体化基站结构不同之处在于，该结构将基站的射频单元和基带处理单元 (BBU, baseband unit) 分隔布设，并将射频单元与天线共同部署在远端。同时考虑不同基站所承载的非均匀业务流量，基带处理单元被集中部署在 BBU 池内，通过基带处理单元之间的协作，优化其资源利用率和运营成本。4G C-RAN 覆盖结构如图 2 所示。

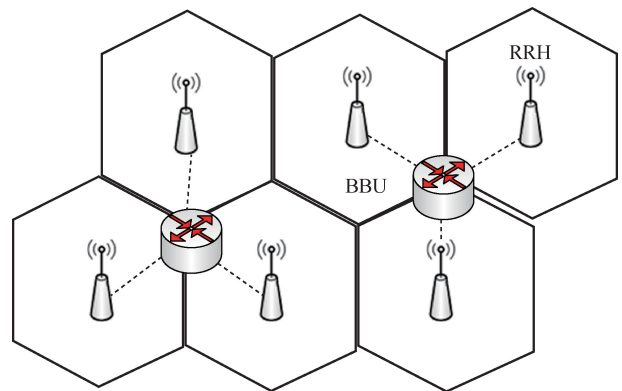


图 2 4G C-RAN 覆盖结构

在该覆盖结构中，BBU 资源池可以对所连接的射频单元进行统一管理，实现资源的系统级动态管控。具体而言，C-RAN 覆盖结构既可以通过为用户分配正交资源避免干扰，也可以通过小区间干扰协调的方式缓减干扰。此外，还采用 CoMP 技术实现多小区联合传输，将干扰信号转化为有用信号，使网络容量得到进一步提升。可是，4G C-RAN 覆盖结构仍缺乏一定的灵活性，难以实现覆盖结构的完全动态重构，不同 BBU 资源池所管控的基站无法通过干扰协调或联合传输为边界用户提供服务，导致边缘用户切换频繁，产生“有信号无服务”的现象，影响用户体验的连续性与

稳定性。

为了克服上述问题，在 5G 系统中，网络单元的功能被重构，基带处理单元被分割为集中单元和分布单元，其中集中单元处理非实时性业务并被集中化、虚拟化部署；分布单元处理实时性业务，既可以与有源天线单元（AAU, active antenna unit）同站点部署至远端（D-RAN 模式），也可在前传资源充足时集中部署在机房内（C-RAN 模式）。5G C-RAN 的两种覆盖模式如图 3 所示，同时 5G C-RAN 采用下一代前传接口（NGFI, next generation forward interface）与网络虚拟化（NFV, network functions virtualization）架构克服传统 C-RAN 架构前传资源不足。数据传输效率低以及网络设备难以扩展的问题。5G C-RAN 架构在引入 5G 空口后可实现多连接、无缝移动性管理以及频谱资源的高效协作，并通过 NFV 获得极大限度的处理资源复用共享，解决移动通信业务动态变化产生的“潮汐”现象，提升系统能效^[11]。不止于此，NFV 的切片技术还支持为用户提供定制化服务并满足各类垂直行业需求，极大地扩展了 5G C-RAN 的服务能力。

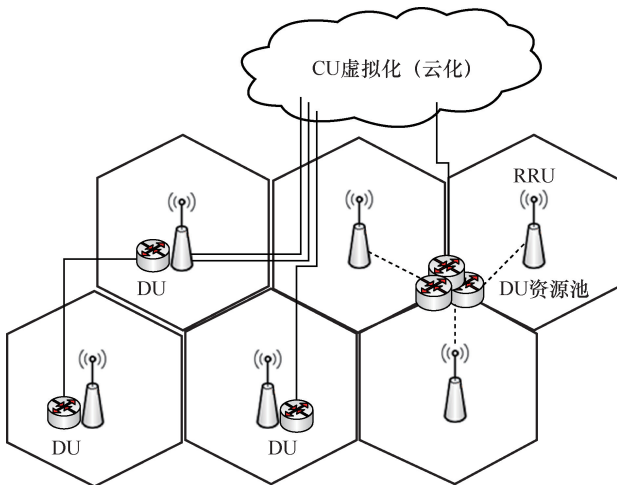


图 3 5G C-RAN 的两种覆盖模式

1.3 Fog-RAN 覆盖结构

Fog-RAN 是一种基于“雾计算”的接入网络结构^[12]，该结构可极大程度地利用网络中边缘节点的分布式计算、缓存和通信能力，将集中在“云”端的负载下沉至边缘节点，这些边缘节点由于距离用户端很近，像雾一样弥漫在用户与核心网之间，因此该结构被称为雾无线电接入网结构。Fog-RAN 覆盖结构如图 4 所示。

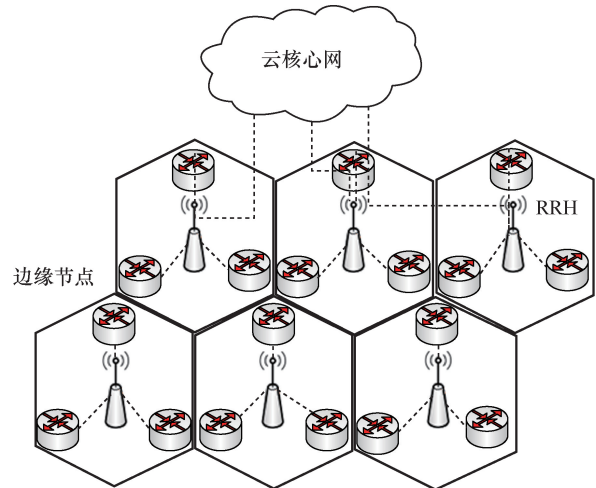


图 4 Fog-RAN 覆盖结构

其中，具有计算和缓存功能的边缘节点之间可相互协作，直接进行局部区域内的资源合理调度与分配，有效地缓解了 5G C-RAN 架构下 CU/DU 资源池的负载处理压力。同时 Fog-RAN 覆盖结构能够降低信息的传输时延，减少链路开销，更有效地支持超低时延业务。然而，其有限的集中管控能力难以协调网络中海量的边缘节点，无法合理、精准地根据全局信息分配计算资源、缓存资源与通信资源，因此如何实现多种维度的资源优化调配是 Fog-RAN 面临的重要难点。

近年来，随着人工智能的发展与大数据的兴起，面向未来万物智联、泛在智能的全场景通信业务，基于 AI 的网络架构和网络管理方案被提出。然而在传统集中式网络架构下，AI 功能的通信成本过高、通信资源利用率极低，并且在数据收集、传输、反馈等过程中会存在隐私泄露的问题。为了解决上述问题，文献[13]提出 AI 与 Fog-RAN 结合的分布式网络结构，该结构充分地利用了 Fog-RAN 边缘节点的计算能力，通过数据分析、模型训练、参数传递等步骤更新 AI 算法，AI 功能与环境更加匹配，网络更加弹性化与智能化。不止于此，为了满足用户差异化业务需求，AI 使能的 Fog-RAN 结构还能够利用多维的感知信息构建不同的业务模型，实现多维异质资源的调度与分配，进一步实现网络的自规划、自优化和自愈合。

1.4 无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构

无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构^[14-15]是在 DAS 和 CoMP 技术的基础上逐步发展得到的。该覆盖结构由大面积区域内的海量接入点（AP, access point）、中央处理单元（CPU, central processing unit）以及

回程链路组成，其中 AP 通过回程链路接入 CPU，CPU 处理 AP 收集到的局部信道状态信息，并根据信道条件为用户分配无线资源。无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构如图 5 所示。

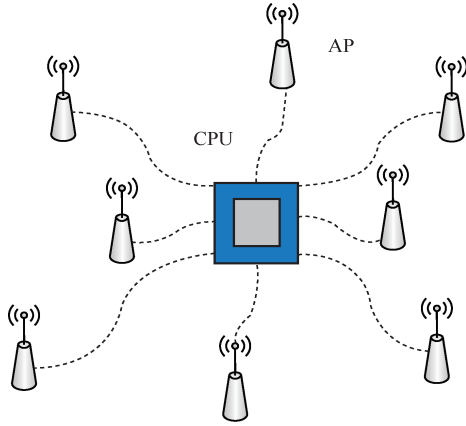


图 5 无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构

与上述蜂窝系统不同，无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构不存在小区的概念，系统所服务的用户数远小于系统所提供的天线数，相比于蜂窝网络，接入点到用户端的距离被大幅减小，路径损耗小，信道增益高，用户的服务质量可以得到有效保证。此外，接入点采取灵活的协同传输方式为用户服务，在满足高数据流量需求的同时，还能够合理地解决由用户的移动性造成的频繁切换问题。

覆盖结构对比见表 1。

表 1

覆盖结构对比

覆盖结构类型	基本特点	需要克服的难题
微蜂窝网络覆盖结构 ^[16-17]	密集化部署，基站到用户端的链路距离近，路径损耗小； 可通过复用频率资源提高频谱利用率，提升系统容量	小蜂窝基站密集化部署所面临的干扰管控问题； 覆盖结构不能随业务的变化进行调整，存在容量覆盖空洞问题
5G C-RAN 覆盖结构分布模式 ^[18]	基于 5G CU/DU 的分离结构，实现 CU 集中化与虚拟化（云化），DU 与 AAU 同站点分布式部署在远端； 集中化后的 CU 能够在 5G 空口协议的基础上实现无缝性移动管理、频谱资源高效协作化等功能	DU 分布式部署所带来的管理和维护成本问题
5G C-RAN 覆盖结构集中模式 ^[18]	在 5G C-RAN 分布模式的基础上实现 DU 的集中池化，AAU 与天线同站点部署在远端，DU 集中统一管理，节约成本； DU 集中化部署将部分物理层功能集中，可实现多小区联合传输、干扰协调等干扰管控手段降低系统中的干扰，覆盖结构可在局部范围内进行调整	不同资源池之间的基站不能通过联合收发为边界用户提供服务，会出现有信号无服务的现象，影响用户体验的连续性与稳定性
Fog-RAN 覆盖结构	在边缘计算的基础上，将具有计算、存储以及通信功能的节点部署在用户的周围，缓解链路吞吐量压力，降低端到端时延	难以实现计算资源、缓存资源和通信资源的联合优化
无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构 ^[19-20]	以用户为中心； 接入点通过回程链路接入 CPU，CPU 执行全局范围内的复杂计算； 接入点到用户端的距离比较近，路径损耗小，带来的信道增益高	CPU 计算复杂度问题； 接入点与 CPU 之间的回程链路吞吐量问题； 不进行接入点间资源的集中池化管控，接入点资源配置固定导致的能耗问题

通过对比发现，现有无线覆盖结构在面对 uHDD 场景时，主要存在以下两个问题。

1) 覆盖结构难以匹配业务分布

传统蜂窝网络覆盖结构的部署方式较为固定，只能在局部范围内进行有限的调整。面对业务分布极不均匀的 uHDD 场景，覆盖结构难以与之匹配，进而导致容量覆盖空洞的产生，降低网络的容量覆盖能力。

2) 缺乏密集网络下的干扰管控

面向未来，接入点密集化已然成为一种趋势，“以用户为中心”的服务模式将带来极大的容量增益与极高的频谱效率提升。然而在超密集网络中，单位空间内有限的时频资源更易发生冲突，复杂的、难以预知的干扰会恶化网络容量，因此超密集网络下的先进干扰管控技术至关重要。

那么如何在现有覆盖结构的基础上进行优化，使其能够满足超高数据密度类业务场景所提出的各项指标。针对上述两点难题，第 2 节提出了面向 uHDD 场景的覆盖结构优化设计理念。

2 面向 uHDD 场景的无线覆盖设计方案

由于现有覆盖结构难以满足 uHDD 场景提出的需求，因此针对该类业务场景特性，有必要对网络覆盖结构进行优化升级，结合第 1 节提出的两点难题，本节梳理了以下设计方案。

1) 蜂窝网络自组织方案

随着蜂窝网络部署的密集化和复杂化, 针对业务的高动态特性, 接入网结构需要具备自组织、自优化的能力实现弹性覆盖。这不仅要求核心网侧的全局管理单元(或接入网侧的局部管理单元)能够实时获取 AP 收集到的环境信息, 而且要在可容忍的时延范围内处理并下发信息。因此, 考虑如何通过覆盖结构的动态调整实现同业务分布的匹配, 如何缩短接入网到核心网之间的传输时延与计算时延, 以及如何满足回程链路的高吞吐量需求是优化蜂窝网络覆盖结构所面临的重大难题。

2) 多维资源按需分配方案

无蜂窝大规模 MIMO 覆盖结构通过 CPU 的集中管控实现了接入点之间的有效协作, 但是传统集中式资源管控架构有限的计算能力难以满足大规模接入点的计算任务需求。类似地, 在超密集蜂窝网络中, 由缺乏资源管控技术导致的、有限空间内同频同时的资源使用冲突也会抑制系统的性能。因此, 面向下一代网络的 uHDD 场景, 设计分布式资源管控架构成为一种潜在的可行方案, 同时考虑将计算能力下沉, 利用边缘节点的实时处理能力可有效减小回程压力与传输时延。

3) 网络绿色节能优化方案

考虑移动用户的业务需求会发生时空演变, 产生业务的“潮汐”现象。因此, 覆盖结构与业务分布以及能量分布的不匹配将导致能源的浪费, 造成网络能效降低。面向我国可持续发展战略, 推进通信行业的节能减排工作刻不容缓, 为了构建绿色、低碳的高能效网络, 实现业务流、能源流以及资源流的相互匹配将是设计下一代超密集网络覆盖结构的关键。

在上述优化方案的驱动下, 第 3 节提出一种面向超密集无线网络的覆盖结构——资源小区。

3 资源小区覆盖结构

第 2 节设计了现有覆盖结构应对 uHDD 场景的优化方案。为了集弹性可扩展、绿色高能效理念为一体, 同时为符合 6G 网络覆盖结构的设计愿景, 本节介绍资源小区覆盖结构的设计理念、工作模式和控制结构, 以 uHDD 场景为例, 提出面向容量覆盖的资源小区生成方法并进行验证。

3.1 资源小区的设计理念与工作模式

资源小区覆盖结构^[21]是实现超高数据密度类

业务场景的关键覆盖结构之一。其中“资源”的含义为网络中所有可利用的资源, 如宏观层面的基站、带宽、功率、波束等资源以及微观层面的时频资源块; “小区”的意思是资源小区内的接入点通过协作传输与协同计算以及接入点的智能休眠, 形成网络中容量覆盖与能量覆盖的基本空间单元, 实现容量覆盖增强和系统能效提升。资源小区与其他覆盖结构本质上的不同之处在于: 资源小区既可以在宏观层面实现覆盖结构随业务分布的变化灵活适变, 消除容量覆盖空洞, 也可以在微观层面为覆盖范围内的用户按需精准分配资源, 实现极致的干扰管控。换句话说, 资源小区作为网络中的基本空间单元, 能够实现业务分布、能量分布、算力覆盖和覆盖结构的高效匹配。资源小区的设计理念在弹性可扩展、绿色高能效的理念基础上进一步演进创新。

1) 覆盖结构自优化理念

覆盖结构自优化是指覆盖结构不仅要实现弹性覆盖, 还要与业务需求实现最佳匹配。网络将融合通信和感知能力, 云端或边端根据感知节点获取的环境信息, 通过集中式或分布式的智能管控, 实现覆盖结构的灵活动态可重构。让网络为更多的用户提供更优质的服务, 打破蜂窝小区的“壁垒”, 允许任意接入点间的协作传输, 实现从“以基站为中心”到“以用户为中心”的服务模式转变。

2) 分布式资源管控理念

传统集中式的资源管控方法在密集化的网络中难以发挥作用。为了解决这一难题, 资源小区采用分布式的资源管控方案, 可通过小区间的协调最大限度地复用无线资源。区域级计算中心可对本区域内各小区 CU 回传的信令信息进行集中编排, 而小区内的 CU 将作为边缘计算节点, 分布式地执行由上一级区域计算中心分发的控制信息, 这种集散式的执行架构能够使小区间的交互、协调更加高效与稳定。同时资源小区还与智能算法相融合, 小区内的 DU 作为系统中的智能体(agent), 通过收集用户设备的信令获取业务、信道等环境状态信息, 从而实现资源小区与环境交互、交互数据检验模型、智能算法优化模型、模型再指导小区进行资源配置的闭环结构, 使资源小区能够精准、高效、合理地分配无线资源。

3) 绿色高能效通信理念

资源小区中“资源”除了指通信系统所需的无

线资源，自然还包括必不可少的能量资源。资源小区一方面在宏观上实现基站级别的负载转移和智能休眠，关断部分利用率低的天线，另一方面在微观上实现子载波和物理资源块的休眠。宏观和微观两种方式的耦合，实现了绿色按需覆盖。

在上述理念的指导下，资源小区支持以下两种覆盖模式以应对不同的业务场景，资源小区的两种覆盖模式如图 6 所示。

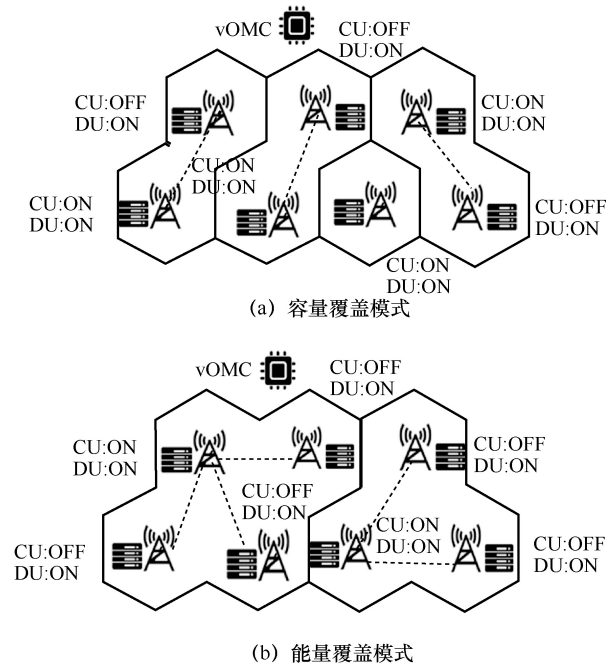


图 6 资源小区的两种覆盖模式

1) 容量覆盖模式

网络中存在的容量覆盖空洞产生的根本原因在于覆盖结构与业务分布的不匹配。资源小区以消除容量覆盖空洞为目标，通过小区结构的柔性调整与接入点相互协作，形成基本空间单元，实现“以用户为中心”的服务模式。在容量覆盖模式下，资源小区存在两种服务模式。

- 复用模式：该模式多工作在网络中用户连接数密集且对数据速率要求不高的场景。网络中所有的小区将复用系统提供的全部带宽，相邻小区之间通过为边缘用户分配彼此正交的频率资源来避免小区间干扰。在此基础上，为进一步提升系统谱效，小区内的每一个用户在分配频率资源时将再次复用频率资源，同时保证用户所共享的频率资源能够在时间和空间两个维度上规避干扰。复用模式从资源小区间和资源小区内两种层面实

现频率复用，不仅充分地利用了网络中宝贵的频率资源，而且能够带来系统能效的显著提升。

- 分集模式：该模式的工作场景一般为用户连接数少但存在高数据速率需求的情况，而且相比于复用模式，该模式下资源小区所包含的接入点数更多。由于小区内每个接入点具备多天发射能力，接入点可同时为用户联合传输信号。此外，小区内接入点可为不同的用户分配正交的频率资源，用户在接收到更强的有用信号的同时干扰信号强度也会降低，因而满足大容量、高数据速率业务的需求。

2) 能量覆盖模式

网络中基站的负载呈周期性变化规律，而固定的功率分配方案将导致网络中能量的流失。为了克服这一现象，资源小区覆盖结构能够实现覆盖结构与能量分布的有效适配。一方面从能源的供给侧出发，通过分布式的资源配置方案，为小区内的基站按需精准分配能量，降低基站的功耗；另一方面从能源的消耗侧出发，根据业务的变化对基站和天线进行休眠和激活，减少能量的开销。

3.2 资源小区控制结构

资源小区控制结构建立在现有 5G gNodeB CU/DU 分离的网络结构基础之上，在 gNodeB 架构中，CU 负责处理非实时协议和服务，DU 负责处理实时协议和物理层协议，AAU 负责射频传输以及部分物理层功能的实现，CU 与 DU 之间通过中传链路（光纤）连接。在 CU 内部分割为协议栈控制面板（gNodeB-CU-CP）和用户面板（gNodeB-CU-UP），二者的功能可以简单地理解为 gNodeB-CU-CP 主要负责信令交互，gNodeB-CU-UP 主要负责处理上下行业务数据。gNodeB-CU-CP 与 gNodeB-CU-UP 分离架构如图 7 所示。

控制层实现覆盖结构灵活适变的本质在于 CU-DU 之间中传链路的调整，也就是说在形成资源小区的基本空间单元后，为符合现有 5G gNodeB CU/DU 分离的网络结构需求，每个资源小区需要选择一个接入点激活 CU 模块功能，其余的接入点激活 DU 模块功能。在此基础上 CU 通过 F1-C 接口建立 gNodeB-CU-CP 与 DU 的联系，通过 E1 接口负责 gNodeB-CU-CP 与 gNodeB-CU-UP 的交互，gNodeB-CU-UP 再通过 F1-U 接口负责一个或多个 DU 的上下行业务数据处理^[22]。

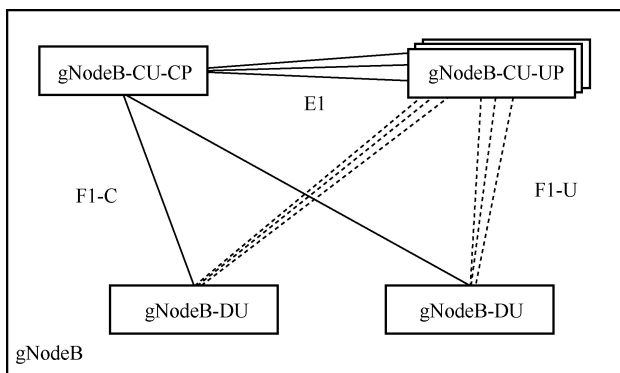


图7 gNodeB-CU-CP与gNodeB-CU-UP分离架构

事实上，为实现大时空跨度业务的连续覆盖，难以通过全局控制的方式对网络中所有接入点进行管控，因此需要将大面积区域划分为多个子区域实现局部控制。对于局部区域内的全部接入点，由一个中央处理单元集中控制并由区域级计算中心执行计算任务，该处理单元部署于接入网侧的虚拟操作和管理中心（vOMC, virtual operation and maintenance center）。接入点可通过回程链路向CPU发送信道状态信息与用户业务信息，CPU也可通过该链路向接入点分发控制信令，接入点在成功接收并读取信令后执行相应的动作。资源小区覆盖结构生成的协议流程如图8所示。

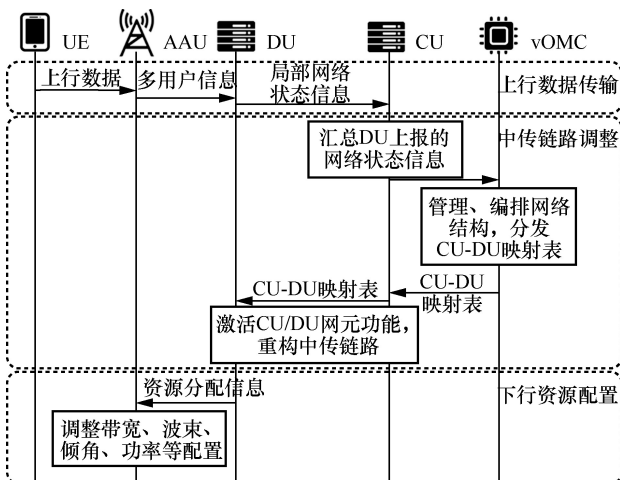


图8 资源小区覆盖结构生成的协议流程

图8表示接入点根据用户发送的上行导频序列与信令信息进行局部区域内的网络状态（如信道状态信息、用户业务信息等）特征提取与压缩，压缩后的信息通过回程链路传递至CPU，CPU综合接收到的信息并决定资源小区内的接入点集合，在所有的信息处理完毕后，CPU将结果用统一、简单的信令表达并分发至接入点，接入点读

取信令后调整中传链路形成资源小区覆盖结构。在采用上述覆盖方案的过程中，DU负责处理独立且实时性高的协议（如无线电链路控制（RLC, radio link control）协议、媒体接入控制（MAC, media access control）协议与物理高层），而CU负责DU间的协调并处理实时性低的协议（如无线电资源控制（RRC, radio resource control）协议、分组数据汇聚协议（PDCP, packet data convergence protocol）），更低一级的射频功能与物理低层由AAU负责。相比于用户分布的小时级变化，资源小区覆盖结构中传链路的分钟级调整可以实现覆盖与业务的精准匹配，但是难以满足信道状态的微秒级变化，因此基于AAU-CU-DU分离的三级网络结构，通过CU/DU的边缘计算与CPU中心计算二者协同的方式可以有效降低时延的影响，同时利用信道或者干扰的时间相干性也可以降低资源编排产生的时延影响。CPU作为区域级管理单元，管控范围可以是一个体育馆、一栋教学楼内的全部接入点，此外，区域级计算中心的存在也能够有效减少单一CPU的计算时延，支撑中传链路的快速灵活重构与资源小区覆盖结构的动态调整。

3.3 资源小区生成方法

本节从容量覆盖增强的角度提出了一种面向容量覆盖的资源小区生成方法，并通过仿真验证了该方法的可行性，最后与实测方案相比证实了该方法的有效性。

3.3.1 面向容量覆盖的资源小区生成方法

本节以提升整网容量为目标，建立网络容量优化模型，提出一种优化算法生成资源小区，使该覆盖结构下的整网容量获得显著提升。

考虑包括 N 个接入点、 M 个用户、 S 个资源小区的二维平面内的超密集网络，接入点集合为 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ ，用户集合为 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ ，资源小区集合为 $\mathcal{RC} = \{C_1, C_2, \dots, C_S\}$ ，任意资源小区 C_s 内的接入点集合为 $\mathcal{C}_s^{\text{AP}} = \{\text{AP}_1, \text{AP}_2, \dots, \text{AP}_s\}$ ，小区内子载波集合表示为 $\mathcal{K}_s = \{1, 2, \dots, K\}$ ，小区内用户集合为 $\mathcal{U}_s = \{1, 2, \dots, U_s\}$ 。

小区内子载波与用户之间的映射关系可以表示为

$$x_{u,i,k}^{C_s} = \begin{cases} 1, & \text{用户}u\text{占用接入点}i\text{的子载波}k \\ 0, & \text{用户}u\text{不占用接入点}i\text{的子载波}k \end{cases} \quad (1)$$

一方面，由于每个接入点只有 K 个独立正交的子载波，因此在一个时隙内资源小区最多能服务的用户数不超过 $|\mathcal{C}_s| \times K$ 个，其中 $|\mathcal{C}_s|$ 表示小区内的接入点数，即

$$\sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{u=1}^{U_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq K |\mathcal{C}_s| \quad (2)$$

另一方面，子载波 $k \in \mathcal{K}_s$ 在一个时隙内被复用的次数不会超过小区内的接入点数 $|\mathcal{C}_s|$ ，因此

$$\sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{u=1}^{U_s} x_{u,i,k}^{C_s} \leq |\mathcal{C}_s| \quad (3)$$

此外，小区内的用户在一个时隙内至多被来自不同接入点的正交的 $|\mathcal{C}_s|$ 个子载波所服务，故

$$\sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq |\mathcal{C}_s| \quad (4)$$

在得知小区内子载波与用户的映射关系后，用户 u 与所关联的基站 i 在子载波上 k 的信噪比表示为

$$\text{SNR}_{u,i,k}^{C_s} = \frac{x_{u,i,k}^{C_s} p_{u,i,k} |h_{u,i,k}|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

其中， $p_{u,i,k}$ 为基站 i 在子载波 k 上为用户 u 分配的功率， $h_{u,i,k}$ 为基站 i 与用户 u 在子载波 k 上的信道增益， σ^2 为用户端的高斯白噪声，对于 $h_{u,i,k}$ ，本文采用双斜率信道模型。

$$h_{u,i,k} = \begin{cases} A_1 \cdot d_{u,i,k} [\text{km}]^{-\alpha_1}, & d_{u,i,k} < d_0 \\ A_2 \cdot d_{u,i,k} [\text{km}]^{-\alpha_2}, & d_{u,i,k} \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， $d_{u,i,k} [\text{km}]$ 表示第 i 个接入点到第 u 个用户的距离且以千米为单位， A_1 与 A_2 表示多斜率路径损耗模型的不同斜率，其物理含义为参考距离 $d=1$ 时的路径损耗， α_1 和 α_2 表示路径损耗系数， d_0 表示临界距离。为了简化模型的复杂度，本文考虑了噪声受限的场景，即通过先进的干扰消除技术可以完全消除基站间的同频干扰，因此用户端的下行速率可以被表示为

$$r_u^{C_s} = \text{Blb} \left(1 + \sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{k=1}^K \text{SNR}_{u,i,k}^{C_s} \right) \quad (7)$$

其中， B 为系统预先为每个子载波设定好的带宽， $r_u^{C_s}$ 需要满足最低速率要求 r_{\min} 。

对系统中的每个资源小区下的每个用户端的下行速率进行求和，得到整网下行速率。

$$R_{\text{total}} = \sum_{s=1}^{\mathcal{C}_s} \sum_{u=1}^{U_s} r_u^{C_s} \quad (8)$$

基于上述假设条件与模型设计，得到整网下行速率优化模型。

$$\max_{\{\text{RC}, U, X, P\}} R_{\text{total}} = \sum_{s=1}^{\mathcal{C}_s} \sum_{u=1}^{U_s} r_u^{C_s}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } C1: & \sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{u=1}^{U_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq K \cdot |\mathcal{C}_s|, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC} \\ C2: & \sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{u=1}^{U_s} x_{u,i,k}^{C_s} \leq |\mathcal{C}_s|, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC}, \forall k \in \mathcal{C}_s \\ C3: & \sum_{i=1}^{\text{AP}_s} \sum_{k=1}^K x_{u,i,k}^{C_s} \leq |\mathcal{C}_s|, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC}, \forall u \in U_s \\ C4: & r_u^{C_s} \geq r_{\min}, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC}, \forall u \in U_s \\ C5: & x_{u,i,k}^{C_s} = \{0, 1\}, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC}, \forall i \in \mathcal{C}_s, \forall u \in U_s, \forall k \in \mathcal{K}_s \\ C6: & 0 \leq p_{u,i,k}^{C_s} \leq p_{\max}, \forall \mathcal{C}_s \in \text{RC}, \forall i \in \mathcal{C}_s, \forall u \in U_s, \forall k \in \mathcal{K}_s \end{aligned} \quad (9)$$

在上述模型中，由于假设已经将用户与资源小区进行匹配，即：任意用户 u 只属于一个用户集合 U_s ，并且该用户集合 U_s 中的所有用户只被对应的资源小区 \mathcal{C}_s 提供服务，因此需要事先对用户进行分簇，本文采取基于用户地理位置的聚类方式—— K -means 算法，步骤如下。

步骤 1 初始化用户地理位置、用户簇数目 K 以及 K 个随机用户中心。

步骤 2 计算 K 个用户中心到其余所有用户的欧氏距离，将距离用户中心欧氏最近的用户划分到一个用户簇。

步骤 3 计算步骤 2 中 K 个用户簇的几何中心，作为新的 K 个用户中心。

步骤 4 重复上述步骤 2 和步骤 3 直至用户簇的几何中心不再发生变化，输出 K 个用户簇。

通过上述步骤即可得到基于地理位置的 K 个用户簇集合，该算法虽然可以根据用户在二维平面内

的分布密度进行划分,但不能将得到的 K 个用户簇直接与资源小区进匹配,理由是初始参数 K 和随机选取的用户中心都会影响资源小区与用户的匹配程度,如果 K 过小,将导致簇内的用户数过多,资源小区有限的接入点无法为过多的用户提供独立正交的频率资源,从而小区内产生同频干扰;如果 K 过大,用户簇的个数大于资源小区数,必然导致容量覆盖空洞的产生,因此,本文提出面向容量覆盖的资源小区生成方法。

该方法是一种基于贪心策略的聚类算法,首先使用基于用户地理位置的 K -means 算法形成用户初始簇,用户初始簇数目 K 可以取 $(N/4, N/2)$ 之间的整数值,在此基础上根据接入点到用户簇中心的距离进行划分得到初始的资源小区集合,进而对资源小区进行细粒度的划分,面向容量覆盖的资源小区生成方法的具体步骤如下。

步骤 1 使用基于用户地理位置的 K -means 算法初始化用户簇 U^0 。

步骤 2 计算 K 个用户簇中心到所有接入点的欧氏距离,将距离用户中心欧氏最近的接入点划分到一个资源小区中,得到初始资源小区集合 RC^0 。

步骤 3 依次判断 RC^0 中资源小区 $C_k^{RC^0}$ 内的用户数是否小于 K ,若是,则将该资源小区 $C_k^{RC^0}$ 输入到资源小区集合 RC 中,否则执行步骤 4。

步骤 4 判断资源小区 $C_k^{RC^0}$ 内的用户数是否大于 $K \cdot |C_s|$,若是,则将该资源小区内的所有接入点视为一个独立的资源小区,并输入到资源小区集合 RC 中,同时每个接入点根据最邻近原则为其覆盖范围内的用户提供服务,否则执行步骤 5。

步骤 5 将资源小区 $C_k^{RC^0}$ 内的每个接入点视为一个子小区,分别计算子小区两两之间合并后的下行速率,然后将速率提升较大的合并在一个子小区内,直至资源小区 $C_k^{RC^0}$ 中没有子小区能够合并或合并的终止条件被满足。

步骤 6 输出资源小区集合 RC 。

在实现该方法的过程中,步骤 5 有以下两点需要注意。

1) 步骤 5 的终止条件

资源小区中可合并的子小区数小于 2 个:在子小区合并的过程中,子小区内的接入点数会不断增

加,接近资源小区 $C_k^{RC^0}$ 中本来的接入点总数,从而使子小区由原来的真子集成为子集,因此应该及时地终止循环。

2) 步骤 5 中子小区的合并方法

步骤 5 中在得到一轮计算子小区两两之间合并后的下行速率后,并非将速率提升最大的子小区合并在一起,这是因为贪心策略只能合并得到当前状态下速率提升最大的小区结构,并非是全局最优的结构,需要一定的随机性使更多的结构被探索到。

3.3.2 仿真场景的构建

仿真所构建的场景为 $86\text{ m} \times 86\text{ m}$ 的体育馆,该场景以近似 1:1 的比例复刻了西安电子科技大学远望谷体育馆主馆,馆内共部署有 22 个 5G 接入点,接入点的水平位置与高度同实际相匹配,每个接入点具备 5G 网元的 CU 与 DU 模块,同时采用 64 个发天线 \times 64 个收天线的有源阵列天线单元,其中每个天线单元可定向收发波束,波束之间不会相互干扰,因此可视作一个噪声受限的系统。仿真场景如图 9 所示。

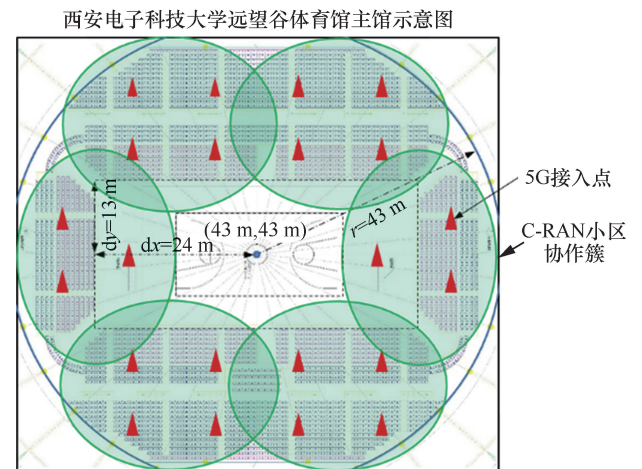


图 9 仿真场景

为了与资源小区覆盖结构进行对比,图 9 中标记了相同仿真场景下的传统 C-RAN 静态均匀覆盖结构。在均匀覆盖结构中,同一个 C-RAN 小区内的接入点使用正交的频率资源为覆盖区域内的用户联合服务,接入点彼此之间不存在干扰。根据 3GPP 发布的关于 5G 基站的标准^[23],将系统总带宽设置为 100 MHz,接入点可分配的物理资源块 (RB, resource block) 数为 273 个,每个 RB 的带宽为 0.36 MHz,根据文献[24-26],仿真参数设置见表 2。

表 2 仿真参数设置

参数	数值
物理资源块带宽 B/MHz	0.36
接入点发射功率 P/W	10
资源块数 K	273
路径损耗斜率 A_1	$10^{-10.38}$
路径损耗斜率 A_2	$10^{-14.54}$
路径损耗因子 α_1	2.09
路径损耗因子 α_2	3.75
临界距离 d_0/km	0.01
初始用户聚类点数 K^0	8

3.3.3 面向容量覆盖的资源小区生成方法可行性验证

首先，验证用户均匀分布场景下算法的有效性。假设体育馆内的用户数依次选取为 1 000, 2 000, ..., 9 000, 且每个用户均有业务需求，使用所提方法生成资源小区弹性覆盖结构与 C-RAN 均匀覆盖结构下的整网下行速率和实际接入用户数进行对比，基于上述假设与选取的参数，用户均匀分布场景下覆盖结构的性能随业务增长的变化规律如图 10 所示。

随着用户密度的增加，当馆内的用户设备少于 2 000 个时，C-RAN 均匀覆盖结构与资源小区弹性覆盖结构的下行速率近似呈线性上升趋势，而用户数超过 2 000 个时，C-RAN 均匀覆盖结构的覆盖效果显著下降，覆盖能力趋于饱和，最大接入用户数不超过 2 000 个，用户平均速率为 4.6 Mbit/s，整网下行速率在 7.6 Gbit/s 附近波动，用户接入率低于 0.55；与 C-RAN 均匀覆盖结构相反，资源小区覆盖结构在用户数小于 3 000 时可以实现用户的 100% 覆盖，在大于 3 000 小于 6 000 时用户离线率不超过 0.1，而用户数大于 6 000 时网络接入的用户数趋近于承载能力上限，整网最大峰值传输速率可达到 25.3 Gbit/s，相较于 C-RAN 静态覆盖结构，速率提升 3.3 倍，接入数提升 3.65 倍，实现了接入用户数与整网下行速率的倍增。对上述结果进行如下推导与分析^[27]。

1) C-RAN 静态覆盖结构

对于 C-RAN 静态覆盖结构而言，共包含 6 个小区（图 9），每个小区可分配的正交子载波数为 $K=273$ 个，因此整网至多接入用户数为

$273 \times 6 = 1638$ 个，所以在用户数小于 1 638 时，曲线呈近似线性上升趋势，而当用户数超过 1 638 时，C-RAN 覆盖结构无法提供更多的子载波给用户，从而达到网络承载能力上界；此时可以推导其网络下行速率的上界，表示为

$$R = N \cdot B \text{lb} \left(1 + \frac{\bar{\gamma} \bar{p} |h(\bar{d})|^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

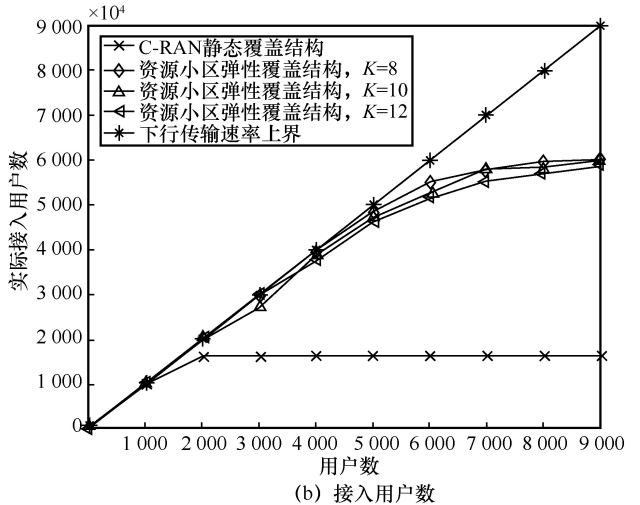
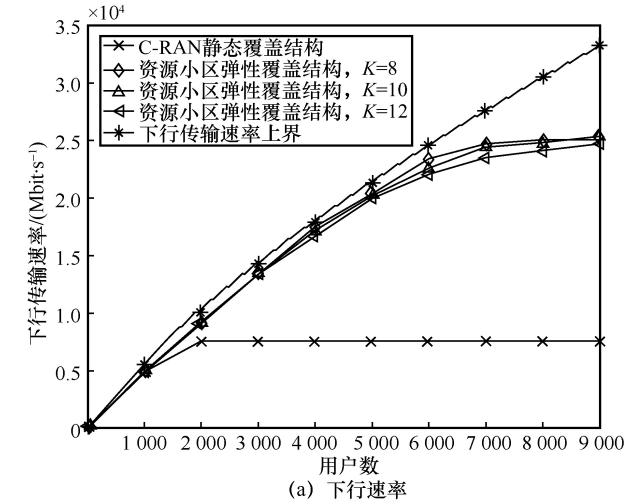


图 10 用户均匀分布场景下覆盖结构的性能随业务增长的变化规律

其中， $\bar{\gamma}$ 为用户的平均分集增益，在 6 个小区的 C-RAN 覆盖结构下，用户分集平均增益 $\bar{\gamma} = 22 \div 6 \approx 3.67$ ， $\bar{p} = P / 273 \approx 36.6 \text{ mW}$ ，用户到接入点的平均距离 \bar{d} 取 0.01 km，代入式(10)可以得到网络下行速率的上界为 8.94 Gbit/s，与仿真结果近似。

2) 资源小区弹性覆盖结构

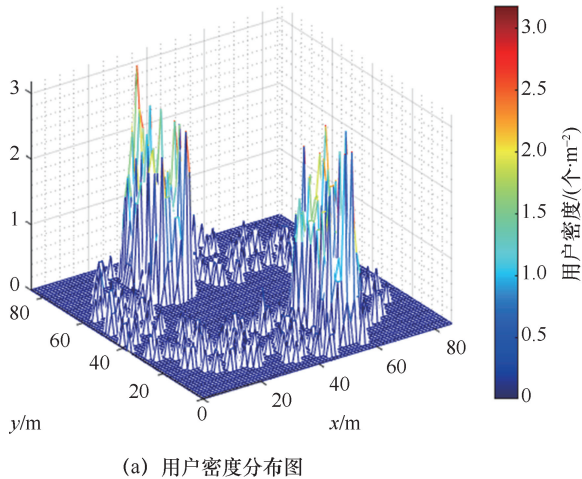
对于资源小区而言，随着用户数的增多，其小区数随着网络中用户数的增多而弹性改变，在用户数小于 1 638 时，接入用户数线与下行速率曲线与

C-RAN 覆盖结构的曲线近似相同；当用户数超过 1 638 而小于 6 006 时，根据本文设计的资源小区生成方法，原始的 6 个簇开始不断被分裂为子小区，更多的用户被允许接入，此时用户端的增益既包括分集增益也包括复用增益，即

$$R = N \cdot \text{Blb} \left(1 + \frac{\bar{\gamma} \bar{p} |h(\bar{d})|^2}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

其中，分集增益为 $\bar{\gamma} = 22/|RC|$ ，复用增益为 $\bar{\eta} = K^0/|RC|$ ，其余参数的取值不变，此时可以绘制出资源小区覆盖结构的理论下行速率上界曲线（图 10(a)），与仿真结果基本相符；当用户数超过 6 006 时，网络承载能力达到上界，速率曲线与接入用户数曲线趋于饱和。

然而经笔者实际考察与调研发现，用户并非总是均匀分布的，本文探究了用户非均匀分布下的资源小区覆盖效果。在用户非均匀分布的场景下，不同区域内的用户密度不再相等，用户密度分布图与资源小区弹性覆盖结构如图 11 所示，选取点位 (21,60)、(31,60)、(65,26)、(55,26)，在上述 4 个点位处假设用户密度以大于 0.5 个/m² 分布，而在剩余区域内用户密度均小于 0.5 个/m²，网络中用户的总数不超过 2 000。使用所提方法生成资源小区弹性覆盖结构并与均匀覆盖结构的下行速率和实际接入用户数进行对比，图 11(a)以等高线的形式展示了用户的分布状态，显然传统的静态 C-RAN 覆盖结构无法满足局部区域内的用户业务需求，难以为小区内的用户进行有效的波束资源分配。而资源小区弹性覆盖结构的小区构型能够与用户的分布特征相互匹配，如图 11(b)所示。



为了更加直观地体现资源小区的覆盖效果，上述仿真场景下用户下行速率分布温度如图 12 所示，可以发现资源小区为网络中的用户提供了更加匹配的覆盖构型，有效缓解了用户密集区域内的资源使用冲突，提升了用户端的信噪比。

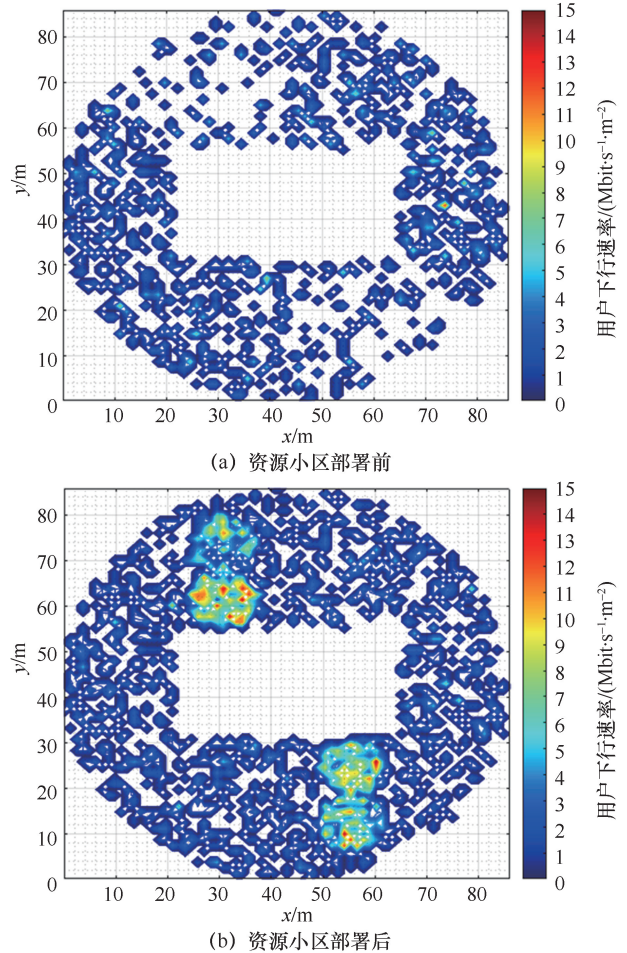


图 12 用户下行速率分布温度

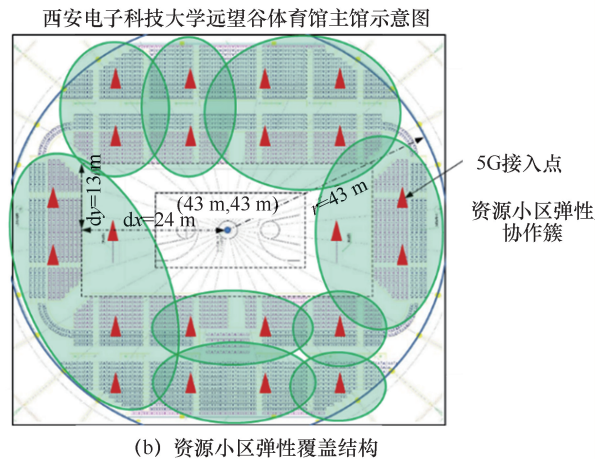


图 11 用户密度分布图与资源小区弹性覆盖结构

出现上述现象的原因是：对于用户非均匀分布的场景，传统 C-RAN 静态覆盖结构在用户密集分布的区域和用户稀疏分布的区域提供的资源一致，有限的无线资源无法保障密集区域内用户的有效接入，覆盖结构与用户分布的不匹配导致用户端下行速率低，整网能效下降；对于资源小区，其覆盖结构可以匹配用户分布特征，在用户稀疏分布的区域，资源小区尽可能多地合并接入点，在用户端产生较高的分集增益，而在用户密集分布的区域，资源小区则尽可能地分裂，通过覆盖结构与用户分布的匹配，将负载分配给不同的小区，实现业务的均衡。

3.3.4 面向容量覆盖的资源小区生成方法有效性验证

该方法的有效性验证在西安电子科技大学远望谷体育馆进行，西电远望谷体育馆——主场馆如图 13 所示。远望谷体育馆作为集体育、展览、会议和大型活动于一体的中型综合性体育场馆，自竣工以来先后承办了第三届全国大学生“互联网+

大赛、全国信息技术融合应用研讨会以及 2021 年全国十四运羽毛球比赛等活动，上述活动是超高数据密度类业务发生的典型场景。例如，在 2021 年的十四运羽毛球比赛中，馆内用户分布不均匀且随时会突发海量业务（语音、图片、直播等）。传统静态分配资源的方式难以应对该类业务场景，会导致用户设备面临有信号无服务的处境。而通过在馆内部署资源小区覆盖结构，克服了上述问题，保障了活动的成功举行。经过调研和实地测量得到，体育馆主馆总面积约为 $86\text{ m} \times 86\text{ m}$ ，羽毛球场占地面积为 $40\text{ m} \times 70\text{ m}$ ，剩余场地的面积为 $4\,596\text{ m}^2$ ，馆内的固定座位数为 3 692 个，备用座位数为 1 990 个。

馆内硬件设备部署如图 14 所示，在该场馆内部署 22 个 4G/5G 共模接入点，接入点密度为 $1\,400\text{ 个}/\text{km}^2$ ，均支持在 1.8 GHz/2.3 GHz/2.6 GHz 3 个频段工作，馆内还布设有 vOMC 执行服务器，其中植入了资源小区生成模块，可按照图 8 所示的资源小区生成协议控制上述所有接入点，支持资源

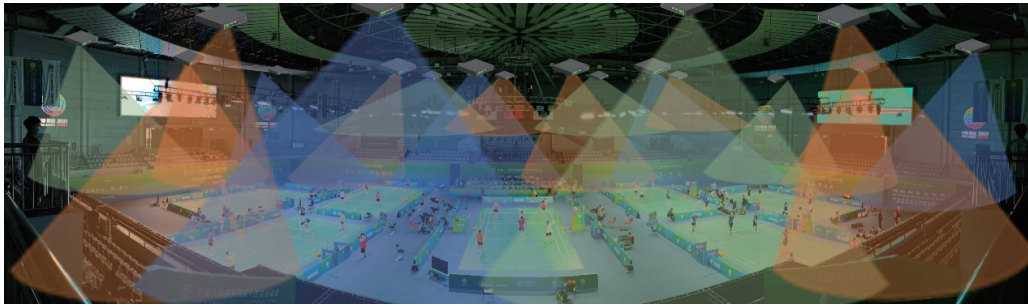
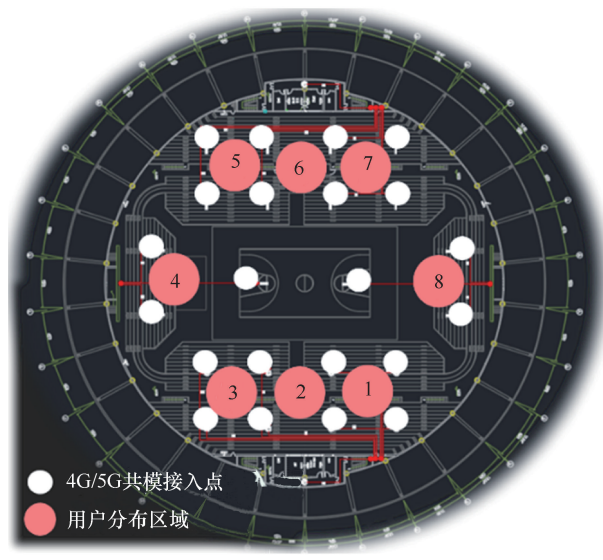


图 13 西电远望谷体育馆——主场馆



(a) vOMC 执行服务器



(b) 接入点部署与用户分布区域

图 14 馆内硬件设备部署

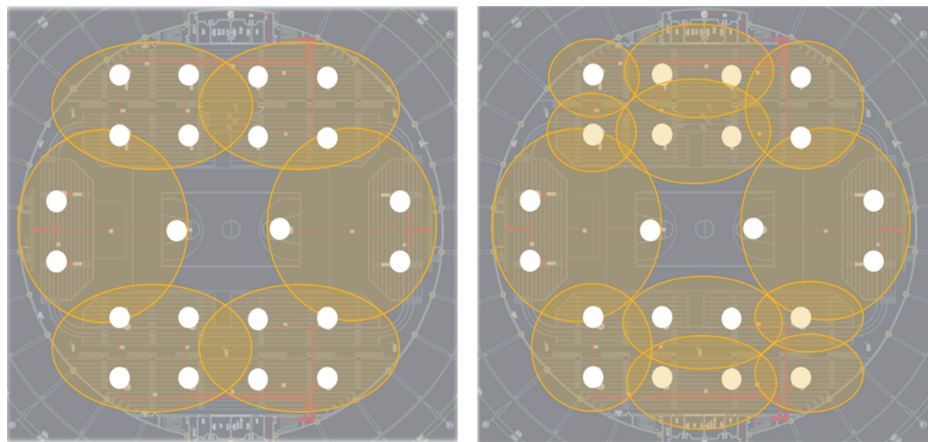
小区覆盖结构的动态调整，同时还具备干扰管控技术，在资源小区覆盖结构的基础上，实现细粒度的资源分配与干扰管控。

在测试的当天，羽毛球场的西侧和东侧同时举行两场比赛，用户集中分布在观众席的东南角和西北角，整个系统内接入的终端数约为 4 500 台，其中区域 1 和区域 5 的终端总数约为 4 000 台，接入设备密度超过 1 个/m²，剩余区域内的终端数约为 500 台，在实测过程中，设备的业务激活率

约为 50%。

实测场景下资源小区覆盖结构如图 15 所示，其中图 15(a)是优化前的资源小区覆盖结构，包含 6 个资源小区，图 15(b)为使用所提方法优化后的弹性资源小区覆盖结构，包含 12 个资源小区。

性能指标验证展示如图 16 所示，图 16(a)为测试所使用的 3 台移动路测终端界面，界面展示的移动终端下行速率分别为 18.9 Mbit/s、31.2 Mbit/s 和 32.8 Mbit/s；图 16(b)为网络分析仪界面，界面



(a) 静态覆盖结构 (b) 弹性覆盖结构

图 15 实测场景下资源小区覆盖结构

NR Throughput 路测终端1		NR Throughput 路测终端2		NR Throughput 路测终端3	
APP Thr'put DL	17.959	APP Thr'put DL	29.640	APP Thr'put DL	31.175
SDAP Thr'put DL	18.004	SDAP Thr'put DL	31.200	SDAP Thr'put DL	32.016
PDCP Thr'put DL	18.944	PDCP Thr'put DL	31.264	PDCP Thr'put DL	32.816
APP Thr'put UL	0.336	APP Thr'put UL	0.481	APP Thr'put UL	0.818
SDAP Thr'put UL	0.336	SDAP Thr'put UL	0.481	SDAP Thr'put UL	0.818
PDCP Thr'put UL	0.355	PDCP Thr'put UL	0.508	PDCP Thr'put UL	0.872
RLC Thr'put UL		RLC Thr'put UL		RLC Thr'put UL	

(a) 移动路测终端界面



(b) 网络分析仪界面

图 16 性能指标验证展示

显示了路测终端的各项信息。资源小区覆盖结构优化前后的网络覆盖能力对比见表 3，反映出资源小区弹性覆盖结构能够与网络中的业务分布更加匹配，用户设备的连接数密度和网络的峰值速率均得到大幅提升，有效地保障了用户的服务质量（QoS, quality of service），增强了网络的覆盖能力。

表 3 资源小区覆盖结构优化前后的网络覆盖能力对比

对比项	优化前	优化后	提升百分比
连接数密度	1.7 个/m ²	2.6 个/m ²	52.94%
整网峰值速率	2.7 Gbit/s	>6.8 Gbit/s	>151.85%

4 资源小区覆盖结构的未来研究方向

4.1 高效设计

在资源小区的高效设计^[28-29]理念中，目前通过覆盖结构的弹性调整实现与非均匀分布业务的相互适配，使每一份能量带来尽可能多的容量增益，同时采用资源精准分配的方式，减少不必要的能量开销，从而提升系统的能量效率。面对业务的“潮汐”现象，资源小区支持基站与天线智能休眠，在满足 QoS 与覆盖率的同时，使接入点根据业务的变化规律适时进入休眠状态，节约基站资源和能量资源。未来，资源小区将扩展新能源技术，在能源的供给侧使用太阳能、风能、潮汐能等清洁能源驱动基站的功耗，降低碳排放，节约不可再生资源。

4.2 空地协同设计

在 6G 网络所提出的天空地海一体化覆盖的背景下，实现信号的广域覆盖是至关重要的一部分。面对超密集网络的复杂干扰与容量覆盖空洞，资源小区覆盖结构扩展空中基站辅助通信平台将有效克服上述问题^[30]。空中接入点灵活、机动的特性能够支持资源小区覆盖结构的高动态调整，可以及时针对突发业务进行迅速部署。资源小区覆盖结构的分布单元可实时收集网络环境信息并上报集中处理单元，一方面，对于一些信道环境难以采集的区域（如森林、冰川、海洋等），空中基站可以作为分布单元进行数据采集与回传；另一方面，当地面网络无法承载回传所需的数据流量时，可以将数据卸载到空中基站，缓解传输压力。此外，空中基站到用户端的直射链路信道可以为用户提供更高的信噪比，避免地面密集网络信号的折射与散射。因此，资源小区扩展空中基站可以在未来网络中有效

实现空对地连续覆盖，增强超密集网络下的容量覆盖能力。

4.3 资源小区与分布式计算相结合的设计

面向 6G 超高数据密度类业务场景、指数级的终端设备、海量的复杂数据和多维极致的性能需求，为现有网络回程链路的吞吐量与云核心网的计算能力提出了极大的挑战。为了克服网络传输能力和集中计算能力受限的问题，未来网络将在现有边缘计算的基础上，采用“算网融合”的长期演进方向^[31-32]。“算网融合”是指网络的计算能力和网络的通信能力深度融合，实现“以网协算，以算强网”的目的。其中，“以网协算”是利用网络的协同感知能力，灵活按需调度计算资源，改善现有网络节点计算能力薄弱问题；“以算强网”是指网络全面应用计算资源，实现网络资源的高效编排与优化，提升网络节点的通信能力与服务能力。“算网融合”的思想与资源小区分布式资源管控的理念高度契合，在资源小区中通过赋能 CU 和 DU 分布式计算能力，网络中无线资源的编排方案和干扰管控策略将更加高效地实现资源小区的容量覆盖增强，同时资源小区覆盖结构的自适应能力将有效调度计算资源，实现结构-计算-业务之间的相互适配，为用户带来更好的 QoS。

4.4 资源小区与新材料结合的设计

新材料作为我国“十四五”期间重点发展的方向之一，将支撑新一代信息技术的研发。智能反射面（IRS, intelligent reflecting surface）^[33-34]是一种由无源反射材料构成的新器件，可以通过软件控制算法操控无线电波，改变传输信号经过反射面后的幅值和相位，实现对电磁波的束缚与控制。资源小区覆盖结构与业务匹配的理念使 IRS 能够与资源小区紧密结合，在宏观上，IRS 可布设在资源小区内的局部热点区域，降低资源小区的负载，弥补信号覆盖空洞，提高网络覆盖率；在微观上，IRS 一方面能够使有用信号规避障碍物，提升用户的信干噪比，获得更高的通信质量，另一方面能够实现波束成形，为用户提供高精度波束，有效提升系统容量，实现容量覆盖增强。除此之外，资源小区可以与先进的半导体技术、新型金属和光学器件等新材料融合，解决在高频波段通信时的高功耗问题。

4.5 资源小区与新型传输技术结合的设计

作为未来网络中一项重要技术——太赫兹波通信，可以带来数据速率的显著提升。目前 5G 所采

用的频段不超过 10 GHz, 在更高的频段上拥有充足的频率资源仍有待使用。太赫兹波频段高、波长短, 可通过缩短基站与用户端之间的链路距离降低路径损耗, 增加网络容量, 满足超高数据密度类业务场景的需求。同时资源小区可以结合超大规模天线阵列^[35], 利用多天线收发技术为用户终端带来更多的分集增益, 在此基础上还可以通过混合波束成形 (HBF, hybrid beam forming)^[36-37]技术从基带数字波束成形与射频模拟成形两个维度对波束进行优化, 进一步提升系统容量。新型传输技术的发展将会使资源小区覆盖结构在面向未来超密集网络下带来更好的表现。

5 结束语

经过数十年的演进, 无线网络覆盖结构由一体化走向多级化, 由同构网络转变为异构网络, 由静态宏覆盖变为灵活致密覆盖, 作为驱动覆盖结构发展的关键因素——用户业务, 将需要更高的峰值数据速率与更大规模的设备接入。本文重点提出一种面向下一代超密集网络的无线覆盖结构——资源小区, 详细地介绍了其弹性覆盖理念、可扩展理念与绿色高效理念。在上述理念的指导下, 阐述了资源小区所支持的容量覆盖模式与能量覆盖模式, 二者分别能够提升网络覆盖能力与系统能效。最后对资源小区的未来发展方向进行了展望, 从高效设计、空地协同设计、与分布式计算结合的设计、与新材料结合的设计以及新型传输技术结合的设计 5 个领域进行简要介绍。

参考文献:

- [1] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021. IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technologies white paper[R]. 2021.
- [2] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(1): 110301.
- [3] ROST P, BANCHS A, BERBERANA I, et al. Mobile network architecture evolution toward 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 84-91.
- [4] 张平, 张建华, 戚琦, 等. Ubiquitous-X: 构建未来 6G 网络[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(6): 913-930. ZHANG P, ZHANG J H, QI Q, et al. Ubiquitous-X: constructing the future 6G networks[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(6): 913-930.
- [5] 牛志升, 周盛, 周世东, 等. 能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战[J]. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42(10): 1191-1203. NIU Z S, ZHOU S, ZHOU S D, et al. Energy efficiency and resource optimized hyper-cellular mobile communication system architecture and its technical challenges[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2012, 42(10): 1191-1203.
- [6] 李莉, 彭木根, 王文博. 下一代宽带移动通信系统中的网络自组织技术[J]. *电信技术*, 2010(5): 71-73. LI L, PENG M G, WANG W B. Network self-organization technology in the next generation broadband mobile communication system[J]. *Telecommunications Technology*, 2010(5): 71-73.
- [7] ZHANG P, TAO X F, ZHANG J H, et al. A vision from the future: beyond 3G TDD[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(1): 38-44.
- [8] ZHOU S, ZHAO T, NIU Z S, et al. Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(1): 12-19.
- [9] 中国移动通信研究院. C-RAN 白皮书: 迈向 5G C-RAN: 需求、架构与挑战[R]. 2016. China Mobile Communication Research Institute. C-RAN white paper: towards 5G C-RAN: requirements, architecture and challenges[R]. 2016.
- [10] HUQKMS, MUMTAZS, RODRIGUEZ J. A C-RAN approach for 5G applications[M]//*Backhauling/Fronthauling for Future Wireless Systems*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016: 9-28.
- [11] DALLA-COSTAA G, BONDAN L, WICKBOLDTJ A, et al. Orchestra: a customizable split-aware NFV orchestrator for dynamic cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(6): 1014-1024.
- [12] PENG M G, YAN S, ZHANG K C, et al. Fog-computing-based radio access networks: issues and challenges[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 46-53.
- [13] 刘晨熙, 刘炳宏, 张贤, 等. 面向智能服务的雾无线接入网络: 原理、技术与挑战[J]. *智能科学与技术学报*, 2021, 3(1): 10-17. LIU C X, LIU B H, ZHANG X, et al. Intelligent service oriented fog radio access network: principles, technologies and challenges[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, 3(1): 10-17.
- [14] 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.
- [15] ZHANG J Y, CHEN S F, LIN Y, et al. Cell-free massive MIMO: a new next-generation paradigm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 99878-99888.
- [16] JIANG W, HAN B, HABIBIM A, et al. The road towards 6G: a comprehensive survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 334-366.
- [17] BHUSHAN N, LI J Y, MALLADI D, et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 82-89.
- [18] CHECKO A, CHRISTIANSEN H L, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 405-426.
- [19] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO: uniformly great service for everyone[C]//*Proceedings of 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 201-205.
- [20] BUZZIS, D'ANDREA C. Cell-free massive MIMO: user-centric approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(6): 706-709.
- [21] XIE Z W, LIU J Y, SHENG M, et al. Exploiting aerial computing for air-to-ground coverage enhancement[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(5): 50-58.

- [22] 3GPP. Overall procedures in gNB-CU/gNB-DU architecture[S]. 2018.
- [23] 3GPP. Base station (BS) radio transmission and reception[S]. 2021.
- [24] DING M, WANG P, LÓPEZ-PÉREZ D, et al. Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2365-2380.
- [25] LIU J Y, SHENG M, LIU L, et al. Performance of small cell networks under multi-slope bounded path loss model: from sparse to ultradense-deployment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11022-11034.
- [26] DAI Y P, LIU J Y, SHENG M, et al. Joint optimization of BS clustering and power control for NOMA-enabled CoMP transmission in dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1924-1937.
- [27] CHEN S Y, LIU X Q, ZHAO T Y, et al. Performance analysis of joint transmission schemes in ultra-dense networks—A unified approach[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(1): 154-167.
- [28] GARCÍA-MORALES J, FEMENIAS G, RIERA-PALOU F. Energy-efficient access-point sleep-mode techniques for cell-free mmWave massive MIMO networks with non-uniform spatial traffic density[J]. IEEE Access, 2020, 8: 137587-137605.
- [29] LÓPEZ-PÉREZ D, DE DOMENICO A, PIOVESAN N, et al. A survey on 5G radio access network energy efficiency: massive MIMO, lean carrier design, sleep modes, and machine learning[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 653-697.
- [30] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.
- CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789.
- [31] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.
- YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 1-11.
- [32] 段晓东, 姚惠娟, 付月霞, 等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 76-85.
- DUAN X D, YAO H J, FU Y X, et al. Computing force network technologies for computing and network integration evolution[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 76-85.
- [33] WANG H, LIU C, SHI Z, et al. On power minimization for IRS-aided downlink NOMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1808-1811.
- [34] LI Z D, CHEN W, WU Q Q, et al. Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 2019-2033.
- [35] ZHANG S J, JIN S, WEN C K, et al. Improving expectation propagation with lattice reduction for massive MIMO detection[J]. China Communications, 2018, 15(12): 49-54.
- [36] HAN S F, CHIH-LIN I, XU Z K, et al. Reference signals design for hybrid analog and digital beamforming[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1191-1193.
- [37] YOUNIS O, FAHMY S. HEE D: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.

[作者简介]



张夏雨 (2000–), 男, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为 5G/6G 移动通信网络技术。



李建东 (1962–), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为智慧/智能互联网络技术、新一代认知/智能无线自组织网络技术、新一代无线移动通信/超密集异构无线网络以及空间信息网络/卫星互联网的架构和组网技术等。



刘俊宇 (1989–), 男, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为异构密集无线网络容量理论及组网技术、天地一体化网络智能组网技术、室内定位技术等。



盛敏 (1975–), 女, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为空间信息网络、移动通信网络、异构网络融合、无线自组织网络等。



史琰 (1975–), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为智能网络、空间信息网络、高性能通信与计算协同等。



解子文 (1996–), 男, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为立体致密无线网络容量覆盖增强技术。