

面向未来移动网络密集连接的关键技术综述

钱志鸿, 肖琳, 王雪

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 在总结密集连接相关研究的基础上, 阐述了未来移动通信网络中密集终端接入的关键技术, 分析了网络架构及相关技术、密集连接的传输技术和接入技术等几个重点方向的研究进展, 提出了多种连接形式并存的灵活性网络结构。针对上下行覆盖不对称问题, 结合用户的服务质量需求, 提出了基于上下行分离网络架构的密集终端接入方案, 阐述了为应对大规模组网和密集连接需求要实现的网络架构立体化和通信与计算一体化的必要性, 并基于太赫兹和区块链等技术对频段向上延伸和频谱资源共享等未来重点研究方向进行了讨论与展望。

关键词: 密集连接; 移动网络; 网络架构; 接入技术; 通信与计算一体化

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021094

Review on strategic technology of dense connection for the future mobile network

QIAN Zhihong, XIAO Lin, WANG Xue

School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: Based on reviews of the work regarding dense connection, the strategic technologies for dense connection in the upcoming future mobile communication were illuminated. The state of the art of dense connection, including network architecture and related technologies, the transmission technology of dense connection, and the access technology of dense connection were analyzed. A flexible access network structure with verity of connection forms coexisting was proposed. Aiming at the asymmetry of uplink and downlink coverage and considering the QoS requirements of users, a dense terminal access scheme based on the uplink-and-downlink-separated network architecture was proposed. The necessity of the three-dimensional network architecture and the integration of communication and computing to meet the needs of large-scale networking and dense connection were illuminated. Based on technologies such as terahertz and block chain, the future strategic exploratory trends such as the upward extension of frequency bands and the sharing of spectrum resources were discussed and prospected.

Keywords: dense connection, mobile network, network architecture, access technology, communication and computation integration

1 引言

移动通信(5G、6G等)与无线网络技术(Wi-Fi、蓝牙和RFID等)结合,构建了应用面越来越宽的

移动网络。随着工业互联网、物联网、智能网联交通^[1]和其他各类应用需求的激增,移动网络的大规模组网和密集连接的难度陡然增加。近年来,移动网络的飞速发展改变了人们的生活方式,国家制造

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61771219); 吉林省科技发展计划基金资助项目(No.20190303137SF, No.20200401084GX, No.20190201187JC)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61771219), Scientific and Technological Development Program of Jilin Province(No.20190303137SF, No.20200401084GX, No.20190201187JC)

强国建设战略咨询委员会主办的《中国制造 2025》重点领域技术创新路线图显示，中国通信设备将步入世界领先行列，同时，国际市场将受到增强型移动带宽（eMBB, enhanced mobile broadband）、大规模机器类通信（mMTC, massive machine type communication）^[2-3]以及高可靠低时延通信（URLLC, ultra-reliable and low latency communication）的推动，实现精度更高、吞吐量更大以及能处理大量数据的实时性高效通信。上述 3 个场景中，特别是 eMBB 和 mMTC 场景，都需要通信系统支持海量终端接入网络。根据国际调研机构 Gartner 预计，2021 年企业和汽车物联网终端设备将比 2020 年的 58 亿上涨 21%，智能医疗保健终端设备将增长 29%，建筑自动化终端设备将达到最大增长速度 42%，全球联网设备将达到 280 亿个，用户数量可能要翻倍几个数量级，到 2025 年，全球联网设备将超过 754 亿。与此同时，各种新兴业务和网络应用井喷式涌现，网络流量也在迅速增长，5G 网络能实现比 4G 网络高达千倍的移动数据流量增长^[4-5]。但据 ITU 预测，随着自动驾驶、高精度智能工业、全息通信等对网络性能的要求不断升级，预计 2030 年左右，5G 系统的开发与应用将达到极限。因此，随着 5G 系统开始全面商用，人们对未来移动通信系统的设想也在逐渐展开，2020 年 2 月，ITU-R 启动了面向 2030 及 6G 的研究工作。贝尔实验室认为未来移动网络将是物理、数字、生物世界的完全融合，将支持整个世界的数字化，真正达成“数字孪生、智慧泛在”的美好愿景^[6]。

未来移动网络应用场景将是对 eMBB、mMTC、URLLC 等传统场景的多方面融合^[7]，比如基础设施智能化的超能交通；超高带宽、超低时延和超可靠性等需求的人机物协同高精度智能工业；超高移动性、全覆盖的空中高速联网；极高吞吐量和极低时延需求的全息通信；全覆盖、超低功耗、超高精度的应急抢险等场景。为了达到未来移动通信网络的场景需求，《6G 无线智能无处不在的关键驱动与研究挑战》白皮书给出了如表 1 所示的 KPI（key performance indicator）。

更高标准的性能指标，会伴随更加困难、复杂的技术挑战。在通信系统不断地向以上愿景演进的过程中，连接密度的持续加大将使整个网络负担加重。由此可见，面向未来移动通信网络时，密集连接并不局限于 mMTC 场景，而是更加多样的、复杂的场景融合。

表 1 6G 网络的 KPI

指标	数值
峰值速率/(Gbit·s ⁻¹)	100
用户体验速率/(Gbit·s ⁻¹)	1
连接密度/(万·km ⁻²)	1 000
时延/ms	0.1
能效/(bit·J ⁻¹)	200
频谱效率/(bit·(s·Hz ⁻¹))	200

近年来，伴随智慧家庭、社区、医疗、工业、农业、电网、交通乃至智慧城市的需求和移动网络技术的发展，各种面向应用的移动网络已开始规划或布设，但从理论和技术层面，远没有达到能应对未来工业互联网、物联网^[8]等大规模、高密度移动网络所要求的技术水平。可喜的是，国内外学者针对未来移动网络密集连接的研究已经取得了具有前瞻性的研究成果和进展。

2 研究进展

随着接入终端设备数量的急剧增加，以及新业务类型的井喷式涌出，通信网络的网络架构、接入技术等方面都在持续发展，本节选取了一些支撑移动通信网络密集连接的关键技术进行了现状总结分析。首先，对使能技术进行了划分，从网络架构、传输技术、接入技术 3 个方面进行了归纳。其次，对这些关键技术的研究和发展过程中遇到的瓶颈问题进行了分析。

2.1 网络架构及相关技术

随着网络规模和网络密度不断增加，密集终端连接将面临越来越多的挑战，催生出各种创新性的解决方案。平面的通信网络已经成为历史，在未来的通信网络中，有承载覆盖的宏基站，有负责连接的微基站，还有承担密集连接的微微基站，构成立体化的、多层次的、分布与协同工作的网络结构。网络中的密集连接具有多样性和灵活性，可以保证用户获得高质量服务，缓解网络拥塞，降低时延。

1) 网络架构

异构网络（HetNet, heterogeneous network）是一种有效的网络体系结构，是实现密集终端连接的有效手段。在宏蜂窝范围内部署小基站^[9]、微微基站、家庭基站以及中继站等低功耗节点，可为密集终端提供高质量服务。宏基站可以实现广域覆盖，

小基站可以弥补宏基站的覆盖漏洞。微微基站负责热点区域的覆盖，有效卸载宏蜂窝的流量，减少用户拥塞。家庭基站又称飞蜂窝基站，由用户自行购买部署，产生的流量通过家庭有线宽带链路传输到移动核心网。中继站用来转发宏基站与终端之间的数据信息，可以提升距离宏基站比较远的边缘终端设备的服务质量。表 2 总结了异构网络中不同类型基站的特性。

表 2 异构网络中不同类型基站的特性

基站类型	发射功率/dBm	覆盖范围/m	回程
宏基站	46	1 000~25 000	S1 接口
小基站	30~37	<300	X2 接口
微微基站	23~30	<100	X2 接口
家庭基站	<23	<50	IP
中继站	30	<300	无线

随着移动通信技术的演进，如大规模多输入多输出 (MIMO, multi input multi output)、毫米波、空中基站等无线接入和组网技术逐渐引入蜂窝网，与运营商部署的 Wi-Fi 接入点共同为数量不断增长的终端提供高质量服务，形成融合的异构无线网络。异构无线网络的组网结构分为松耦合、紧耦合、超紧耦合 3 种类型。松耦合结构是指不同的网络之间相互独立并且通过接口相连，使用移动 IP 实现不同网络之间的融合，该结构的使用范围更广、可扩展性更强。紧耦合结构是指通过连接单元组件将无线接入网络和蜂窝核心网相连接，网络的互联点在核心网一侧，这种结构下终端的网络切换时延和失败概率较小。与紧耦合结构不同的是，超紧耦合结构下网络的互联点在接入网端，终端的网络切换性能最好。

异构无线网络所需技术的演进从来不是一蹴而就的，在这个漫长的过程中，各种无线技术相互补充，不同技术的无线网络将会共存且覆盖范围重叠，这种立体化的网络结构将是未来移动通信发展的重要趋势。在异构无线网络中，密集终端设备通常在多种类型基站的覆盖之下。目前，通常将终端设备的接入和资源分配放在一起进行研究，统称为资源管理问题。本节将首先介绍异构网络中常用的接入方法，并分析各类方法的特性以及对密集终端接入场景的适用性，然后总结资源分配的相关研究。终端设备接入是指选择某个网络为设备提供连接服务。在密集终端接入情形下，终端业务更加多样，无线网络信道传输质量差异性更大。考虑到这些因素，需要高效的接入选择算法，使密集用户可以接入最合适的网络进行数据传输。常用的接入选择方法有基于 max-RSS^[10]、基于偏置用户^[11]、基于代价函数、基于组合优化、基于负载均衡、基于博弈论等方法的接入选择方案。表 3 分析了目前 4 类较常用的接入方法性能^[12-17]。除了这几类以外，有研究者将马尔可夫模型加入接入选择方案中^[18]，以最大化期望总回报和最小化平均切换次数为目标，并使用遗传算法找到最优决策，确保了基于优先级的服务质量之间的最佳权衡。

尽管研究者对异构网络的接入问题进行了大量的研究且取得了一些成果，但是对未来移动网络密集终端请求接入时，网络接入选择方法还存在许多需解决和优化的地方。1) 大多数接入选择方法没能考虑到异构无线网络资源的整体利用，需要在终端设备的接入过程中兼顾用户侧服务质量的保证与网络侧整体性能的提升。2) 随着用户规模的扩大，很多用户的偏好是不同的，在考虑用户偏好这

表 3 异构无线网络接入方法性能分析

分类	含义	方案特性	文献
基于代价函数	将影响用户体验的指标加权在一起，用户通过对候选网络的代价函数值进行选择	权重的建立往往具有较大的主观性，如果参数两两对比后显示不一致，则需要再次耗时构造判断矩阵检查	文献[12-13]
基于组合优化算法	通常采用模糊逻辑算法和神经网络算法等。用户收集网络参数，并上报给切换管理实体，利用神经网络进行训练，得到接入决策结果	需要中心控制实体进行辅助	文献[14-15]
基于负载均衡	将终端设备的接入请求分配至负载最低的接入点，当系统的负载达到一定程度时，将执行垂直切换进行重新分布，达到负载均衡	用户有可能连接到质量较差的网络中，无法有效保障用户实时或非实时业务的 QoS 需求	文献[16]
基于博弈论	在多用户同时接入选网的环境下，有较高的公平性和准确性	所有参与者都计算各自的利益，可能会损害异构网络整体性能；为了不同参与者的纳什均衡收敛，算法复杂度高；一个博弈周期只能得出一个用户选网结果，密集用户选网效率低	文献[17]

一因素时需进行区分。3) 在用户规模扩大的同时, 业务类型更加繁多, 因此在考虑网络综合性能并保证负载尽量均衡的同时, 要将业务类型考虑在内。

由于严重的干扰和负载不均衡的问题限制了异构网络性能, 需采用高效的资源管理技术予以解决。文献[19]提出了一种具有干扰消除的资源管理算法 RMIP, 如果移动台 (MS, mobile station) 的干扰源能识别出来, 在 MS 上就能获取预期的信号, 排除干扰。结果表明, 在密集部署的立体网中, 如果所有干扰能被精准识别, RMIP 算法可以达到至少 19.03% 的吞吐量。为了抑制两层异构大规模 MIMO 网络的上行干扰, 有学者提出了一种联合上行功率控制和小区范围扩展方案^[20], 而对于三层或更多层次的混合蜂窝网络的研究则刚刚起步。在这种立体化结构中, 前两层采用微波 (μ 波) 链路, 第三层采用毫米波链路, 对不同的网络层次, 天线部署的方式不同^[21], 利用最小速率模型可以获得覆盖率、区域频谱效率和能效等关键性能指标数据。目前, 为了使立体化网络部署简化, 基于云平台辅助的方式引起了人们的关注。云辅助无线网络正在成为下一代蜂窝网络的变革性范例架构。Younis 等^[22]以提高无线网络的能源效率为目标, 提出了新的资源分配方案, 并在云辅助模式下实现计算任务的卸载, 通过协调微蜂窝的传输, 实现对网络资源的集中管理, 有效地利用了网络资源^[23]。

由于现有异构网络资源管理研究主要以扩大网络覆盖、提升频谱效率为目标, 但是异构网络的能效是运营商关心的重要指标, 这与运营成本息息相关。因此, 异构网络能效、频谱效率、覆盖率之间的均衡问题, 有待于进一步研究。而且部分用户可能具有高移动特性, 将导致频繁的网络切换, 因此, 为密集用户提供平滑切换、降低能源消耗及保证安全性是至关重要的问题^[24]。

2) 相关技术

人们对未来移动通信网最强烈的期待是众连接、高智能, 即将物联网技术引入移动通信系统中^[25], 实现人-人、物-物、人-物-机器的泛在通信。而通信网络的密集连接将会导致网络不堪重负、多层蜂窝网络之间负载不均衡等问题, 必须寻求更具灵活性的组网方式, 从根本上解决众连接的问题。利用 D2D 技术对负载过高的基站进行分流, 保证大量无法接入网络的用户接入网或实时通信, 可降低通信系统中心节点的数据压力, 提升频谱利用率, 扩

大网络容量, 使终端设备具备多种接入选择模式, 实现网络广覆盖, 为设备的零时延通信、终端密集接入及数据传输开辟了新的途径^[26]。

运用 D2D 技术的关键是建立 D2D 的连接机制, 即 2 个设备如何发现彼此并建立 D2D 链路。在下一代移动通信场景中, 会有密集用户设备存在, 所以需要一种快速、精准、高效的 D2D 连接机制。D2D 的连接机制包括分布式连接和集中式连接^[27]。分布式的连接机制对于基础设施遭到破坏的公共安全网络非常有效, 而对于密集连接的高密度场景, 集中式的连接机制更好。文献[28]研究了集中式面向密集连接的 D2D 连接机制, 提出了基于信念空间搜索的机制, 覆盖区域根据设备过去的历史信息以及移动模式划分为不同的信念子空间, 降低了设备发现复杂度、时延, 未来可以扩展到多小区的快速移动设备问题。在 5G D2D 中, 这 2 种发现过程并存, 共同保证设备之间的可靠连接, 增强覆盖范围, 对 D2D 可持续性发展至关重要。针对密集连接场景, 有学者提出了一种新的 D2D 通信辅助移动流量卸载 (DATO, D2D communication assisted traffic offloading) 方案^[29], 在数据传输过程中, 一些设备可以通过 D2D 将流量从宏基站卸载到小基站, 从而提高整体网络容量。将 DATO 问题公式化为 0-1 线性规划, 并使用动态规划为确定用户设备的访问模式提供最优解。结果表明, 在支持用户访问数量和用户能量消耗等方面, 此方案有明显优势。

近年来, 将 D2D 与其他技术结合的研究成为热点, 比如 D2D-MIMO、D2D-NOMA 传输策略等, 可以充分利用信道资源, 扩大网络容量, 是一项值得探讨和期待的研究工作。大规模 MIMO 与 D2D 的集成可以进一步提高频谱效率, 但也会增加覆盖区域内和区间干扰, 该研究主要集中在资源分配与干扰管理^[30]、接收机的设计、性能与复杂度之间的权衡^[31]等方面。Lin 等^[32]提出了基于和速率最大化的 D2D 多用户 MIMO 系统收发机设计方法。与大多数研究不同, 该方法假设蜂窝和 D2D 传输具有同等的优先级, 并且每个设备可以在蜂窝模式和 D2D 模式之间自由切换。D2D-NOMA 传输策略首次将 NOMA 技术与基于蜂窝的 D2D 网络相结合, 在这种场景下引入了全新的“D2D 簇”的概念^[33], 一个 D2D 发射机通过 NOMA 技术, 使用相同的信道资源同时向多个 D2D 接收机传输数据。将 D2D

和 NOMA 二者结合起来更加提高了频谱利用率,是支持未来密集终端接入网络的重要潜力。在 D2D-NOMA 方案中,也可以运用联合子信道和功率分配算法,为每个 D2D 组分配一个信道,并使用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件求解最优功率分配,获得较高的能量效率和吞吐量^[34]。而 NOMA 的重要延伸——分层多路复用,与 mmWave、大规模 MIMO 系统、D2D 相结合^[35],能同时提供广播和单播服务,保证更少的自干扰,提高系统容量。

随着终端数量的增长,数据量也呈现出爆炸式增长,需要新方法减轻蜂窝网络的流量负担,避免反复下载相同的数据内容。缓存技术被用来减少来自蜂窝网络的流量负载、缓解拥塞以及内容请求时延^[36]。由于 D2D 技术在数据卸载与分发中同样发挥着巨大作用,因此将 D2D 通信与缓存技术相结合不仅可以降低传输时延和传输功率,还可以提高网络性能。为了降低 D2D 蜂窝网络的流量负载,有研究者通过深度学习和社会关系的综合协作缓存策略获得最大化数据卸载率,针对内容请求预测,运用神经网络协同过滤 (NCF, neural collaborative filtering) 算法提高了预测精度^[37]。目前已有研究利用人工智能 (AI, artificial intelligence) 分析框架来解决单小区、异构网络、D2D 等场景的缓存问题^[38],在基站、微基站以及用户设备等基础设施和终端设备上智能计算及内容缓存,当用户需要这些内容时直接从缓存节点处获取,这不但可以避免回程链路的容量受限问题,还可以减少用户请求时间和传输时延,提高服务质量。终端通过 D2D 通信分享缓存内容,进一步增加了任务的卸载率和网络吞吐量。但由于缓存节点的缓存容量有限,而终端设备可能请求的内容是海量的,如何选择适当的内容进行缓存,以保证较高的缓存命中率和卸载率,是实现密集连接的关键性问题。

2.2 密集连接的传输技术

密集连接必然产生大量的数据,这为充分利用有限的频谱资源进行高效的无线传输和射频传输提出了新的研究课题。随着新兴应用和智能终端的发展,预计未来 10 年移动数据流量将增长 1 000 倍左右^[39],要实现未来移动通信网络海量密集终端数据接入以及数据的高速传输,就一定要充分利用有限的频谱资源。本节总结了全双工通信、大规模 MIMO 技术的研究现状,并分析了部署每种技术的挑战。

1) 全双工通信

目前的蜂窝网络技术无法支撑密集的无线用户设备接入,为了在有限的频带资源下满足日益增长的移动无线通信的需求,研究者开始研究并改善一些关键技术以应对频谱稀缺问题,例如全双工 (FD, full duplex) 通信技术^[40]。全双工通信技术能够同时同频完成信息的发送和接收,在理想状态下,该技术能够倍增频谱效率。已有学者研究并实现了基于全双工技术的无线通信实验平台^[41-42],证明了采用全双工技术的系统信道容量是半双工技术信道容量的两倍,这样的技术优势受到了业界内的广泛关注。目前,全双工通信技术已被应用到了全双工蜂窝通信、全双工双向通信以及全双工中继通信等场景,如图 1 所示。

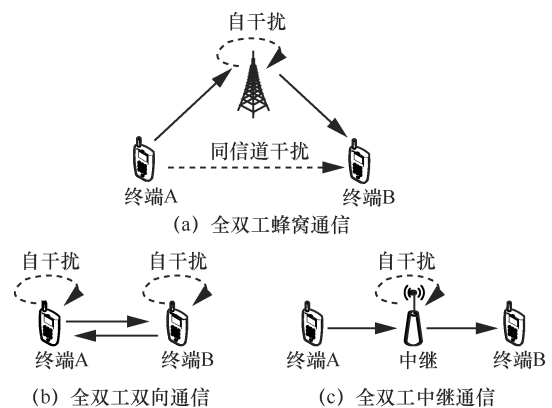


图 1 全双工通信的 3 种场景

在全双工收发机的模型中,发射天线 Tx 到接收天线 Rx 之间的信道是环路信道,发射信号 T_s 经过环路信道衰减,到达接收端形成了自干扰信号 I_s ,除了 I_s 以外,接收端还接收到其他终端的有用信号 R_s 。因为收发机体积受限, Tx 与 Rx 之间距离短,所以有用信号的衰减要大于自干扰信号的衰减。由此看来,全双工技术引入的自干扰如果不能被有效抑制,会影响其工作性能。在近几年的研究中,采用数字域自干扰消除、射频域自干扰消除、天线抵消等方法较有成效。

自干扰消除通常分为被动和主动两大类^[43]。被动自干扰消除是指由于路径损耗效应,使自干扰信号到达 Rx 的功率降低,减少其对接收信号的影响。被动自干扰包括天线抵消、定向天线、天线隔离等技术,目前主流方法是天线抵消技术,此项技术是指利用 Tx 与 Rx 之间的部署距离和信号波长之间的数学关系式达到干扰抵消的效果。天线抵消技术能

够实现约 30 dB 的信号干扰抑制^[44]，若与主动干扰消除等方法结合，可以实现高达 60 dB 的抵消能力。这证明了只使用被动干扰消除不足以得到更精确的接收信号，为了将信噪比降低到噪声水平以下，必须使用主动干扰消除技术进一步抑制干扰。

主动消除主要包括射频域和数字域 2 种干扰消除方式，其原理是在 Rx 处构造抵消信号，进而与自干扰信号相加或相减，以此消除自干扰对有用信号的影响。现有研究表明，射频消除技术能够将自干扰信号强度降低几十分贝，例如，有研究者以最小化剩余自干扰信号功率为准则，在宽带场景下研究全双工通信的直接耦合模拟消除，实现了多抽头结构下的模拟域自干扰信号抵消，实验分析得到最佳自干扰抑制能力约为 80 dB^[45]。与直接耦合模拟消除相比，间接耦合需额外增加一条发射链路来重构自干扰信号，有实验表明当系统带宽为 10 MHz、载波频率为 2.4 GHz 时，自干扰抑制能力约为 32 dB^[46]。从结构上看，直接耦合模拟消除要比间接耦合简单，开销更低。射频消除后会有残余信号干扰，需要借助数字域消除技术进一步降低。根据现有研究可知，数字域消除可以归为 3 类：基于导频的数字域自干扰消除^[47]、自适应数字自干扰抵消^[48]以及基于预编码的数字域自干扰消除^[49]。有研究者基于最小均方算法的参数学习设计自适应数字自干扰抵消方案，在 20 MHz 的带宽条件下，实现了约 100 dB 的自干扰抑制能力^[47]。表 4 为自干扰消除技术的性能优势对比。

在未来移动通信系统中，要实现海量且密集用户设备接入及产生的数据高速传输，就一定要做到

充分利用有限的频谱资源。随着各类干扰消除技术的进步，全双工通信提升频谱效率的优势也愈发显著，但是原有的通信协议并不能完全发挥出全双工的优势，因此如何设计高效的适用于全双工的通信协议，同时可以完成自干扰消除过程，是一个值得深入研究的课题。

2) 大规模 MIMO 技术

阵列天线从最初的多天线接收分集到发射分集，再到空时编码、空间复用、预编码、混合波束成形，最终形成了大规模 MIMO 技术^[57]。大规模 MIMO 技术在基站端配置大规模天线阵列，能将无线能量传播方向指向目标用户所在位置，将干扰程度保持在尽可能低的水平^[58-59]，充分利用空间资源实现同一时频上大量用户与基站通信，大幅提升了系统的频谱利用率与能量效率，在不增加基站密度和带宽的条件下，大规模 MIMO 技术通过增加基站天线数目提高系统容量，其基本形式已经在 3GPP 蜂窝标准中采用^[60-63]。

学术界和工业界搭建了一系列实验平台验证大规模 MIMO 技术的性能优势。2016 年，瑞典隆德大学和英国布里斯托大学合作研发了具有 128 根天线的大规模 MIMO 实验平台^[64]，系统的频谱效率达到了 $79.4 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ 。2017 年，中兴公司与日本软银完成了在商用场景下，大规模 MIMO 系统 TDD 模式下的性能验证，使用 24 台终端设备进行同步数据下载，在 20 MHz 带宽下实现了 956 Mbit/s 峰值传输速率。目前，大规模 MIMO 技术伴随着 5G 的发展逐渐开始商用，在未来 6G 通信系统中大规模 MIMO 技术也将扮演重要角色^[65]。

表 4 自干扰消除技术的性能优势对比

类别	技术	方法	文献	优点	缺点
被动自干扰消除	天线抵消	—	文献[44]	易实施，抵消能力，稳健性好	需手动调谐射频电路，固定天线，发射功率受限
	定向天线	—	文献[42]	降低 Tx 与 Rx 之间耦合的可能性	天线波束范围限制
	天线隔离	—	文献[50]	由于路径损耗，SI 信号强度衰减；设备间干扰低	设备体积、地理位置、成本受限；仅限 SISO 场景
主动自干扰消除	射频域	直接耦合	文献[45, 51-53]	对线性和非线性干扰都能有效抑制	灵活性不够
		间接耦合	文献[46, 54]	射频域自干扰消除结构易实现，原理简单	成本较高，器件所占体积大
	数字域	基于导频法	文献[47]	调制独立性	抵消能力有限
		自适应消除	文献[48, 55]	自适应对抗时变环境，实时性好	很难兼顾收敛性和稳态性
		基于预编码	文献[56]	能实现高级优化，容量优化	需信号估计，需进行自干扰信道矩阵的奇异值分解

与传统的 MIMO 技术相比,大规模 MIMO 具有空间分辨率高、能量传输高效、运算复杂度低、有效降低空口时延等优点。对于一般连接密度的通信网络,大规模 MIMO 服务天线数量大于用户数,通过产生过量的信道增益来服务有限数目的用户。但在未来移动通信网络密集终端请求接入的场景下,用户的数量远远超过服务天线的数量,一些研究显示了利用大规模 MIMO 支持密集连接的可行性^[66-67]。基于 MIMO 的蜂窝系统中大规模连接方案,可以运用稀疏帧结构和基于字典学习的非协调接入协议^[66],使大量设备不需要任何事先的调度过程传输数据,与传统的方案相比,该方案可以极大地提高资源利用率和能源效率。大规模 MIMO 应用于工业物联网中^[67],可以为需要低功耗和中等数据速率的系统带来处理增益。

大规模 MIMO 技术虽然取得了不错的研究进展,但仍有许多问题亟待解决。此技术主要支持 2 种通信模式,即时分双工(TDD, time division duplexing)模式和频分双工(FDD, frequency division duplexing)模式。目前商用的主要是基于 TDD 模式的大规模 MIMO 系统,在 TDD 模式下,基站需要精准捕获当前的信道状态信息(CSI, channel state information)^[68],才可以保证可靠的上下行数据传输。捕获信道状态信息的方法主要分为基于导频的信道估计和盲信道估计,但后者误码率和复杂度较高,因此,基于导频的信道估计更常用。基于 TDD 的大规模 MIMO 系统利用上下行的互易性获得期

望值,这种方式可降低信道开销,复杂度较低且对基站天线数目没有限制要求。实际系统会给不同小区用户分配同一正交或非正交导频序列,这使目标基站无法区分其是否为本小区用户,这种干扰即导频污染^[69]。当用户设备数量非常大时,TDD 模式大规模 MIMO 系统的研究重点是设计导频序列以消除导频污染,捕获准确的 CSI。已有很多研究针对导频污染对大规模 MIMO 性能的影响进行了分析^[59],表 5 中总结了典型的抑制导频污染的方法。

尽管目前 TDD 模式大规模 MIMO 系统应用的更多,但 FDD 模式下的传输信号稳定性和对复杂电磁环境适应性要优于 TDD 模式,在未来大规模系统中也具备良好的前景。FDD 模式下实现大规模 MIMO 系统重要的挑战是基站获取下行 CSI 需要巨大的开销。与 TDD 不同的是,FDD 模式需要通过终端设备进行基于导频的信号估计,然后通过上行信道反馈将下行 CSI 传给基站。若用户数目非常大,导频开销的急剧增加与有限的时频资源是相冲突的。因此,如何在保证低反馈开销的前提下,精准捕获 CSI 是极具挑战性的问题之一。文献[78]提出一种联合空分复用方案,先将用户进行分组,第一级预编码利用每个组协方差矩阵相互正交性消除组间干扰,得到降维的等效信道,进而降低了反馈开销。Bazzi 等^[79]利用最小均方误差(MMSE, minimum mean square error)估计信道,提出一种迭代导频优化方案。Kuo 等^[80]首次将压缩感知算法引

表 5 典型的抑制导频污染的方法分析

方向	类别	方法	性能分析	文献
信道估计	线性信道估计	提出了一种基于压缩的线性最小均方误差信道估计算法	与传统的线性相比,降低了计算复杂度,提高了效率	文献[70]
	非线性信道估计	利用物理环境中有限散射引起的低秩特性,提出了一种基于并行因子的估计方案	较 ESPRIT 算法,显著提高了估计性能。在天线数目较大的情形下,计算复杂度小	文献[71]
帧结构	基于导频移位结构	确定波束成形向量以减少来自其他小区的干扰;执行接收波束成形;进行信道估计	有效地降低了导频干扰的影响,并提高了频谱效率	文献[72]
	叠加型结构	提出了基于叠加导频的信道估计非迭代方案,推导了匹配滤波器输出端的上行 SINR	叠加型帧结构在提高大规模 MIMO 系统频谱利用率方面要优于传统帧结构	文献[73]
导频分配	基于信道协方差	将设备分组,用信道协方差矩阵的正交性衡量用户间潜在干扰,为其分配相同导频序列而不影响系统性能	提高了频谱效率;在高信噪比和强相关情况下,均方误差性能增益显著。	文献[74]
	智能导频分配	测量相同导频用户引起的区间干扰;将最小干扰的导频分配给最差信道质量的用户	优化了系统内用户的最小上行 SINR	文献[75]
预编码	线性编码	ZF、匹配滤波、预编码、MMSE 预编码	计算复杂度低,实用性强	文献[76]
	非线性编码	THP、脏纸编码	复杂度较高,但性能优于线性编码	文献[77]

入大规模 MIMO 系统的 CSI 反馈中,根据信道条件动态地调整 CSI 反馈方案。压缩感知算法通常使用迭代法恢复 CSI,随着密集用户接入网络,将无法保证 CSI 重构实时性,而且压缩感知经常依赖大规模 MIMO 信道某些基向量的稀疏性假设,这与现实还是有很大差别的。随着 AI 技术的发展,将 AI 与移动网络相结合,渗透到核心网、传输网、接入网等各个层面,有助于实现高效的网络资源管理,增强网络各项使能技术的性能,提升系统安全的智能化水平和移动网络的内生安全性。有研究者提出基于深度学习 CSI 反馈方案 CsiNet^[81],该方案与压缩感知算法相比获得了更快的 CSI 重构速度以及 CSI 反馈准确性,但此类方案仍然面临在复杂场景下 CSI 重构准确性较低的问题,在低反馈开销以及室外复杂场景下仍面临 CSI 重构精度较低的问题。

随着大规模 MIMO 技术的不断发展,目前 Cell-free 大规模 MIMO 系统颇受关注。这是一种分布式系统,小区无边界,所有的单天线在 Cell-free 大规模 MIMO 系统中同时为全部目标用户服务。Cell-free 大规模 MIMO 有 95% 的可能性将单用户吞吐量提高近 5 倍^[82],在相关阴影衰落条件下提高 10 倍。特别是目前初步研究的基于无线电条带网络结构的 Cell-free 大规模 MIMO 系统^[83],能使移动通信网络的部署更加容易和灵活,具有更高频谱效率和优异的空间分集。在未来通信网络中将其应用于密集街道、公共交通、大型会议场馆、地铁车站,是一个值得期待的选择。综上所述,大规模 MIMO 是支持未来移动通信密集连接的关键技术之一,其信道信息获取技术、预编码、接收机等设计都是需要深入研究的理论和技术问题^[84],同时也是未来实现密集终端连接的需求。

2.3 密集连接的接入技术

在未来移动通信网络中,传统的正交多址 (OMA, orthogonal multiple access) 技术,如时分多址 (TDMA, time division multiple access)、频分多址 (FDMA, frequency division multiple access) 和正交频分多址 (OFDM, orthogonal frequency division multiple) ^[85] 等技术,难以支持密集终端接入网络。因此,必须采用新型接入技术,根据现有研究成果,本节从物理层和媒体访问控制 (MAC, media access control) 层进行归纳分析。

1) 物理层接入技术

多址技术对无线网络的接入密度起着决定性

的作用,传统的 OMA 技术受限于正交的无线资源划分,已无法满足无线网络对密集连接和超高数据速率的要求。作为一种非正交接入方式,NOMA 能在有限的频谱上增加访问设备的数量,并允许多个设备同时接入而不受可用正交资源的限制,共享相同的时频资源块^[86-89],可显著提高频谱效率,帮助信道状态信息较差的网络边缘用户接入网络,具备支持密集连接的潜力。但是,这会增加接收机的复杂度,产生严重的共信道干扰,因此,实现 NOMA 的关键是干扰管理。到目前为止,已提出的 NOMA 方案基本分为 2 类,即功率域 NOMA (PD-NOMA) ^[90-91] 和码域 NOMA (CD-NOMA) ^[92-93] 方案。

PD-NOMA 实现了功率域的多路复用,使多个用户共享相同的时频资源。在发送端将不同用户产生的信号经过信道编码和调制后叠加发送,使用串行干扰消除法 (SIC, successive interference cancellation) 完成接收信号解调^[94]。文献[95-96]提出了一种传输速率回退算法,有效地缓解了信道估计误差的影响。实验结果表明,在存在信道估计误差的情况下,NOMA 能比 OMA 获得更大的用户吞吐量增益。NOMA 技术有如下问题需要继续深入研究。1) 高效 SIC 接收机设计。目前基于线性检测算法的 SIC 每一步都会有残余,这对 NOMA 系统性能影响很大。因此,需要设计高性能的非线性检测算法。Li 等^[97]基于最小输出能量准则设计了新的接收机,将期望信号与产生干扰的用户设备分离。还有研究者分析了使用联合多用户检测器 JMuD 的 NOMA 系统性能,它可以同时检测所有用户的信号,从而降低检测时间要求^[98]。2) 信道估计。大多数研究都假设系统已知完全信道状态信息。随着未来移动通信系统中用户数目的增加,干扰会更加复杂,信道估计误差会更严重。因此,NOMA 系统需要精确的信道估计,Kara 等^[99]分析了具有不完善的 SIC 和 CSI 的 NOMA 系统的错误性能,推导了闭式的精确误码概率。文献[100]通过推导迭代线性最小均方误差 (LMMSE, linear minimum mean square error) 算法,以加权最小二乘算法为初始化点,实现了信道估计。3) 资源分配。NOMA 用户之间功率分配的准确性会影响系统的吞吐量。最优资源分配方案复杂度极高,是因为要对可行域内多维搜索空间进行搜索。设计低复杂度资源分配算法至关重要,当然也必须做好性能和复杂性之间的权衡。文献[101]提出了有效的功率

分配方案,保证了上下行链路的服务质量(QoS, quality of service)。也有学者研究了基于公平性的最优资源分配方法,在系统和速率方面提高了 35%^[102]。

CD-NOMA 中的扩频序列是稀疏序列或非正交弱相关序列^[103],衍生出稀疏扩频码分多址(LDS-CDMA, low-density spreading CDMA)^[104]。LDS-CDMA 利用 CDMA 中的稀疏扩频序列提高系统性能,以减少每个芯片的干扰。将 LDS-CDMA 与 OFDM 结合,又衍生出了稀疏扩频正交频分复用(LDS-OFDM, low-density spreading aided OFDM)^[105],LDS-OFDM 可以将发送的符号映射到稀疏扩频序列,然后在不同的子载波上发送,且允许符号数量大于子载波数量,达到提高频谱效率的作用。为了应对设备的密集连接,2014 年,AL-Imari 等^[106]提出了多用户共享访问(MUSA, multi-user shared access),能在没有任何容量损失的情况下,保证多路复用用户之间的公平性。文献[107]讨论了 MUSA 上行链路,运用复杂多域码设计和接收端 SIC 多用户检测,证明在相同正交资源下支持密集终端的高可靠性访问,且复杂度低,更适合在免授权情况下传输。基于 LDS-CDMA,有学者提出了稀疏码分多址接入技术(SCMA, sparse code multiple access)^[108-110],秉承了低复杂度的特点。Lu 等^[111]提出了一种信道估计和数据译码联合的 SCMA 方案。Yuan 等^[112]采用稀疏块循环矩阵作为导频矩阵,结合正交匹配追踪算法,在未知的主动用户稀疏度条件下,实现了上行免授权 SCMA 中的主动用户检测,获取了稀疏信道响应模型,保证在不超宽带物联网(NB-IoT, narrow band Internet of things)标准要求的最大重传输次数(128 次)的情况下,基于稀疏块循环矩阵的主动用户检测可降低导频开销。Miuccio 等^[113]针对大规模机器类通信的场景,提出了物理随机接入信道和物理上行共享信道之间的动态资源分配的联合控制,对物理上行共享信道资源采用了 SCMA 技术,实验表明,此方案显著提高了通信成功率,降低了能耗。

综上所述,PD-NOMA 和 CD-NOMA 都利用了信道共享的新自由度来支持密集终端接入网络。然而,这 2 种非正交接入技术都需设计有效的收发机对抗共信道干扰。考虑到密集连接中的高维信道矩阵,可以设计简单有效的收发机,更好地应对密集终端接入网络的场景。

事实上,NOMA 技术并非伴随 MIMO 技术而产生,但研究者发现,两者的结合能带来珠联璧合的效果。尤其针对密集连接情形,这种结合更加受到关注。但由于单天线情形下,用户的信道增益是标量,通过比较大小可以判断信道条件的好坏,然而,MIMO 场景中的信道是矩阵表示,导致 NOMA 在 MIMO 技术上的扩展存在困难。文献[114]利用物联网用户对服务质量需求不同的特点,设计了面向对象服务质量的 MIMO-NOMA 控制系统,提出了一种新的预编码和功率分配策略,确保在大量用户信道条件相似的情况下,也能发挥 NOMA 的优势。另一种大规模 MIMO-NOMA 方案采用接收天线选择模式,在提高用户公平性和降低复杂度的前提下,能显著地增加总速率容量和连接设备的数量^[115]。与其他 MIMO-NOMA 方案相比,这个方案保证了公平性,且可以扩展到任意用户数的应用场景,能解决未来海量用户密集接入网络的公平性问题。

2) MAC 层接入技术

MAC 层中,随机接入模块控制着通信系统中接入终端的总数量,所采用的多址接入方法与系统容量、吞吐量等性能指标息息相关。MAC 层的新型多址接入技术基本上是对 ALOHA 技术的改进,ALOHA 协议是一种免授权随机接入方式,其内容是只要有数据待发就可以进行发送,不考虑接收端的状态,传统的 ALOHA 协议采用了 OMA 的方式,很容易导致碰撞问题的发生,进而会导致时延过高、吞吐量较低,系统的吞吐量最大只能达到 0.18 packet/slot^[116]。随后,研究者提出了 ALOHA 的一系列改进版本,基于时隙的 ALOHA(SA, slotted ALOHA)引入了时隙的概念,用户只能在下一时隙到来时才可以发送数据,系统最大吞吐量可提升到 0.36 packet/slot。在 SA 的基础上,分集时隙 ALOHA(DSA, diversity slotted aloha)^[117]是指一个包可多次发送,增加了发送成功概率。DSA 衍生出基于竞争解决的分集时隙 ALOHA(CRDSA, contention resolution diversity slotted aloha),在接收端引入了 SIC,一个终端在一个帧中只能发送一次数据包,并伴随着包含位置信息的复制包,以便在解析时可通过成功解出的数据包消除复制包带来的干扰,吞吐量可达到 0.55 packet/slot。Alvi 等^[118]提出了具有发射功率分集的 CRDSA,每个复制包是以随机选择的功率电平发射的,利用加权二分图分

析了低密度奇偶校验 (LDPC, low density parity check) 码的性能, 并使用基于图的消息传递算法模拟 SIC 解码。基于非规则的 LDPC 码, 不规则重复时隙的 ALOHA (IRSA, irregular repetition slotted ALOHA) 允许每个用户可重复发送不同的数据包, 在接收端使用迭代置信传播解码, 可达到比 CRDSA 更高的吞吐量。研究者对基于帧的 IRSA 吞吐量和分组解码概率进行了分析^[119-120], 通常是每个帧中用户设备和时隙的数量趋于无穷大的渐近状态进行分析。Saha 等^[121]以最小化无授权大规模机器类型通信中的平均信息年龄为目标, 对基于帧的 IRSA 协议进行了优化设计。以上几种方法的性能对比如表 6 所示。

2015 年, Paolini 等^[122]将上述改进型技术结合成了更为通用的编码时隙 ALOHA (CSA, code slotted ALOHA) 技术。用户采用数据包删余纠错码, 以用户数据包为单位对多个数据包编码以产生冗余数据包, 并在接收端使用 SIC 解决碰撞。为了在 mMTC 中利用稀缺的无线电资源实现密集终端接入, Ma 等^[123]将物理层的多址接入技术 CTSSMA 与 MAC 层编码时隙 ALOHA 相结合, 通过提高这种多时隙设计的冲突解决能力, 可以为潜在的 IIoT 应用实现大型机器类型设备之间的高可靠性通信。

虽然现有的新型多址接入技术可以从物理层、MAC 层解决海量密集终端接入网络时发生碰撞问题并且提高系统容量, 但仍然存在以下挑战。1) 由于物理层技术是针对单个数据包的传输, 无法利用多个时隙解决碰撞。而 MAC 层是多个数据包的传输, 针对单个时隙解决碰撞能力有限, 因此需要实现物理层和 MAC 层多址接入技术的联合使用。2) 目前接收端常采用 SIC 或者置信传播解码, 这 2 类迭代算法复杂程度偏高, 尤其是针对密集用户接入的情形。因此需要降低接收算法的复杂度或者设计

新的高效接收算法。

3 方案探讨

随着智能移动终端的大规模普及, 通信网络发展呈现出大容量、多终端、移动性的发展趋势, 旨在为海量终端设备提供多元化、差异化服务和随时随地的最佳连接。在当下及未来的通信网络发展中, 密集终端接入网络时, 通信链路的构建、灵活的网络架构将成为持久的研究主题。在传统蜂窝网络中, 终端的上行和下行会与同一个基站传输数据, 终端会根据下行接收信号强度选择基站接入。但由于上行时用户设备的发射功率差异不明显, 而下行宏蜂窝的覆盖范围要比小基站覆盖范围大得多, 导致基站的上下行覆盖范围不重叠。这就需要在多种技术融合的未来移动通信网络中, 灵活应对上下行基站覆盖不对称问题, 因此, 有必要设计一个考虑用户差异化 QoS 需求、联合考虑上下行不同关联基站的需求的网络架构和接入方案, 为用户提供最佳的连接, 提高密集终端接入网络成功率。

2019 年 3 月, 6G 旗舰计划组织的“6G 无线峰会”在芬兰召开, 发布了 6G 白皮书——《6G 泛在无线智能的关键驱动因素及其研究挑战》。在通信系统不断演进以及市场巨大的需求下, 新型移动通信业务对未来移动通信网络提出了新的需求和挑战, 换句话说, 需要在更新的通信体系架构下解决新的问题。但由于多种独立接入网络缺乏更有效的协调, 未来的移动无线通信网络将是多种技术的融合, 通信体系在演进的同时不断融入新兴的无线通信技术, 如何协同这些技术扩展、完备网络架构成为重点。例如, D2D 技术可以均衡分流通信系统中的数据量, 减轻基站的负载, 同时丰富通信网络接入方式。若将非正交多址技术与 D2D 技术结合起

表 6 基于 ALOHA 改进的多址接入技术的性能对比

分类	含义	性能对比	文献
SA	将时间分为离散的时隙, 用户必须等到下一个时隙才可以发送数据	减少了数据产生冲突的可能性, 提高了信道的利用率	文献[116]
DSA	用户将相同的数据包在上行接入周期内不同时隙上重复发送多次	在适中的负载下, 较 SA 相比吞吐量更高、时延更低。但对于密集用户接入网络场景, 接入效果还是不理想	文献[117]
CRDSA	在接收端引入了 SIC, 这使很多原本因碰撞而被丢失的数据包被还原出来, 避免了重传	与 DSA 相比, CRDSA 吞吐量和时延等性能都有所提高, 且有更高的解决碰撞能力	文献[118]
IRSA	每个用户均具有不同的数据包重复次数, 并在接收端利用迭代置信传播对数据包解码	实现比 CRDSA 更高的吞吐量	文献[119-120]

来, 基站仅与一个用户同步后就可以将数据传给多个用户, 减少信令开销, 同时提高频谱效率。由此可见, 未来通信系统需要基于多种技术融合的网络架构, 考虑用户 QoS 需求的差异化建立可靠高效的通信链路、考虑低时延支持密集连接等科学问题。

在通信网络演进的过程中, 密集终端特征越发明显, 由多种接入网络、多种新兴技术、多种频谱接入等构成的多元化、多层次、广连接的立体化网络将会成为未来移动通信网络的重要场景。中国移动提出了集中式无线接入网络 (C-RAN, centralized RAN) 的概念^[124], 与传统的无线网络相比, C-RAN 有如下几点优势。1) 将大量业务转移出核心网, 为互联网业务减负; 2) 面向协作的天线提高网络容量、频谱效率; 3) 基于负载的自适应资源分配; 4) 降低部署成本、减小能源消耗; 5) 节约 5G 建设中的资本支出和运营成本。根据上述演进目标, 本文针对未来移动通信网络密集连接的需求, 运用 D2D、非正交多址接入、移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing)^[125]等多种技术, 设计了基于上下行分离网络架构的密集终端接入方案。除了传统的 D2D 通信技术以外, D2D 和 NOMA 组成的新兴连接方式也是一个值得考虑的选择。由于 NOMA 允许多个用户在时间和频率上共享相同的资源, 因此一个 D2D 发射机可以通过 NOMA 技术同时向多个 D2D 接收机发送信息, 可以提升网络容量、降低时延、提升通信服务质量。相比于传统的 LTE 系统, 架构中考虑了 D-RAN、C-RAN 这 2 种连接形式,

负责接入的宏基站与小基站立体化并存获得了大容量和广覆盖, 由小基站相互连接组成的蜂窝 Mesh 网络具有网络稳定、部署速度快、改善边缘区域网络性能的特点。终端接入网络时有多种网络可以选择, 基于以上网络架构的设计, 本文提出的联合网络与用户侧的上行接入方案如图 2 所示。

本文考虑密集终端接入网络, 上行链路一是联合考虑网络本身的部署情况和用户的异质 QoS 需求选择网络, 二是主要通过 D2D、D2D-NOMA 的灵活通信形式减轻基站负担、扩大网络容量; 下行链路接入网充分利用异构网络架构带来的性能优势, 将用户以 MEC 辅助基站的方式分配至异构网络中共存的各类型基站, 实现高效的资源利用和管理, 最终实现灵活的上下行密集用户入网方案。

在上行链路中, 针对密集连接的需求, 从设备接入网络的角度出发, 引入 D2D、NOMA 技术, 尽可能分担网络流量, 发挥新兴技术的优势。目前大多数研究只考虑网络侧的客观评价, 这可能会导致在密集接入时用户都选择同一个网络而发生拥挤。本文为了兼顾用户侧和网络双侧的利益, 提出了一种联合考虑用户和网络侧接入选择策略。在构建网络侧参数时, 传统的简单加权法获得的效用函数会导致各个指标间相互补偿。所以本文采用乘法指数加权法 (MEW, multiplicative exponent weighting) 来表示, 即

$$U(x_i) = \prod_{n=1}^N [U_n(x_n)]^{w_n} \quad (1)$$

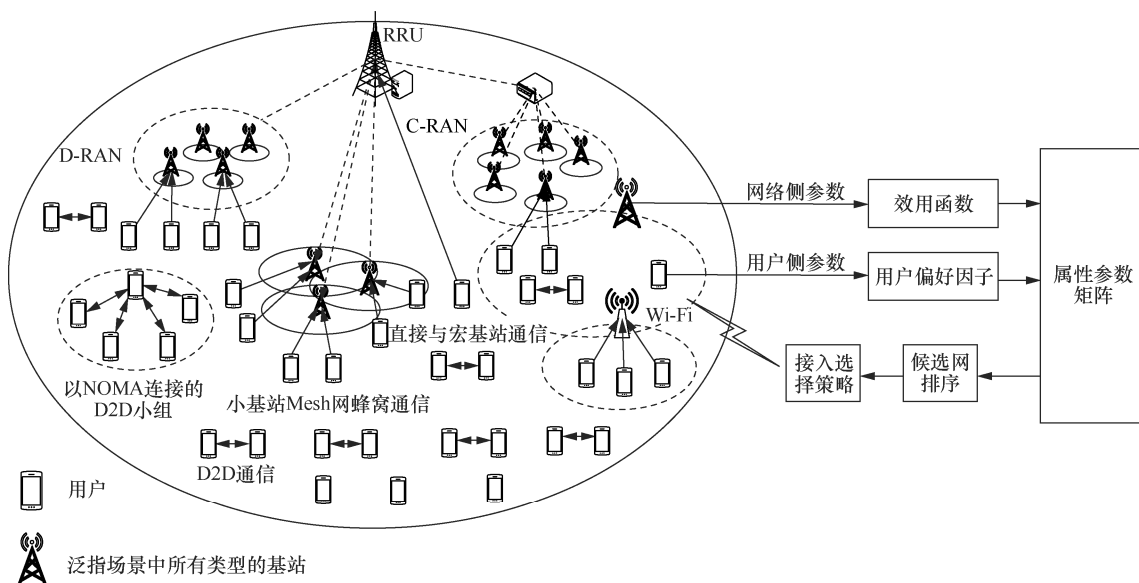


图 2 联合网络与用户侧的上行接入方案

其中, N 表示所考虑因素的总数目, x_n 表示网络参数 n 的值, w_n 表示权重值, $U_n(\cdot)$ 表示网络参数 n 的效用函数。

首先, 构建属性参数矩阵, 此矩阵既考虑网络侧参数, 也考虑用户侧参数, 网络侧参数包括检测到的网络信息, 如网络负载、系统带宽、网络资费、能耗、吞吐量、时延等, 用户侧考虑用户偏好的信息, 如用户的业务需求。图 2 中由一个泛指类型的基站获取网络的信息, 这个基站可表示网络中任意类型的基站。属性参数矩阵由效用函数和用户偏好因子共同构成, 用户偏好因子包括用户对网络的要求, 如资费、带宽等。其次, 对网络进行初次排除, 去掉明显不符合需求的网络, 如吞吐量、带宽等指标不符合的网络。然后, 重新对属性参数矩阵进行自适应修正以及归一化。计算权重因子并进行动态调整, 之后与属性参数矩阵共同对剩余候选网络进行排序, 最终用户通过此接入选择策略接入最佳网络。

由于智能通信是未来发展趋势^[126], 因此采用机器学习解决密集终端接入网络是值得研究的问题, 尽管在此场景中找到最佳策略是一个挑战, 但是深度强化学习 (DRL, deep reinforcement learning) 可以克服高维空间的决策困难, 赋予无线网络认知的能力。与博弈论或者其他静态优化理论相比, DRL 为密集连接提供了更加灵活高效的途径。1) DRL 的智能体在与环境交互过程中, 不需要复杂的信息就可以推导出最优接入策略; 2) DRL 的目标是长期累积回报最大化, 而不是瞬间值最大化, 可以避免频繁切换。上行密集终端接入是从用户角度考虑多网络接入选择, 本文提出利用马尔可夫决策过程 (MDP, Markov decision process) 智能地确定接入网络策略, 并且建模不同网络中用户数量的变化。利用基于深度强化学习的策略解决密集用户上行接入问题, 每个用户设备自主地与动态未知的环境交互。通过在每个用户设备的接入决策和本地观察之间确定最佳策略, 使用户智能地接入一个合适的基站, 以提高系统的长期吞吐量。由于环境状态和状态转移概率经常是未知状态, 这使密集终端接入是一个无模型问题。近端策略优化 (PPO, proximal policy optimization) 是一种无模型、基于行动者-评论家 (AC, actor-critic) 和策略梯度的算法。PPO 可以避免较大的策略更新, 使用变化率来表征新旧策略的不同, 保证策略更新不会太大, 可提高可靠

性能, 减小计算复杂度。因此, 可以使用 PPO 算法对目标函数进行优化, 以此得到最佳的用户接入网络策略。

密集终端接入网络是一个合作多智能体问题, 需要对 MDP 进行扩展, $M = \{S, A, N, \mathcal{R}, P, Z, O, \gamma\}$ 。其中, S 表示网络状态集 $s_t \in S$, 比如用户的业务、候选网络中的用户数量、终端到不同网络的距离等; 智能体的动作空间 A 为终端的基站选择方案, 联合动作空间集合表示为 $A = A_1 \times \dots \times A_N$, $a_t^{(n,u,v)} \in A$ 是指终端 n 在时刻 t 做出的动作, $u \in \{0, 1\}$ 表示终端是否接入宏基站, 0 表示未接入, 1 表示已接入, $v \in \{0, 1, \dots, k\}$ 表示终端可选择接入 k 个小基站, 以下都用 a_t^n 来代表; 智能体的个数为 N , $n \in N = \{1, 2, \dots, N\}$; 基于联合动作空间的回报函数 \mathcal{R} 由所有智能体共享, 在 MDP 模型中, 智能体以长期累积最大化收益为目标, 因此 \mathcal{R} 是以提升整个网络的性能为目标, 回报值是一个与网络状态相关的函数; P 表示状态转移概率, 若终端 n 在决策时刻 t 执行了一个动作 a_t^n , 状态由 S_t^n 转移到下一个确定的状态 S_{t+1}^n , 此过程并不发生状态转移, $P(S_{t+1}^n | S_t^n, a_t^n) : S \times A \times S = 1$; Z 表示智能体的本地观察集合, 如 z_t^n 是终端 n 的本地观察, $z_t^n \in Z$; O 表示观察函数, $O(s) : S \rightarrow Z$; γ 表示决策过程中的折扣因子。本文考虑 3 个参数: 网络吞吐量 μ 、网络平均时延 τ 和网络抖动 η 。动作执行后, 若网络吞吐量提高、网络时延和抖动降低, 则被视为正向接入, 反之视为负向接入。正向接入比负向接入有更高的回报值, 回报值定义为各个网络的 QoS 参数加权。为了消除量纲的影响, 需要对参数进行归一化, 吞吐量、时延、抖动的归一化函数分别为

$$f(\mu) = \frac{\mu - L_\mu}{U_\mu - L_\mu} \quad (2)$$

$$f(\tau) = \frac{U_\tau - \tau}{U_\tau - L_\tau} \quad (3)$$

$$f(\eta) = \frac{U_\eta - \eta}{U_\eta - L_\eta} \quad (4)$$

其中, U 和 L 代表其对应参数的最大值和最小值。

由归一化后的参数加权后, 对于终端 n 得到的回报为

$$r^n(z_t^n, a_t^n) = \omega_\mu f_n(\mu) + \omega_\tau f_n(\tau) + \omega_\eta f_n(\eta) \quad (5)$$

其中, 智能体 n 是基于策略 $\pi^n(a_t^n | z_t^n)$:

$Z \times A \rightarrow \{0,1\}$ 选择接入网络的动作； ω 表示权重值。

由于智能体在采取接入网络动作时会考虑其他智能体的接入策略情况，可采取针对其他智能体联合动作的最优接入动作。于是，多智能体共享的回报函数 \mathcal{R} 表示为

$$\mathcal{R}(s_t, a_t) = \sum_{n=1}^N r^n(z_t^n, a_t) \quad (6)$$

对于每一个状态 s ，都有一个多人决策，策略集合表示为 $\Pi = \{\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^N\}$ ，其中 $\pi(a_t | s_t) = \prod_{n=1}^N \pi^n(a_t^n | z_t^n)$ 。所有智能体基于合作寻找最优的分散接入策略集成 Π^* ，那么，状态-价值函数 Q^π 可以表示^[127]为

$$Q^\pi(s_t, a_t) = \mathbb{E}_{s_{t+1}, a_{t+1}, \dots} [\mathcal{R}_t | s_t, a_t] \quad (7)$$

状态值函数 V^π 和优势函数 A^π 分别表示为

$$V^\pi(s_t) = \mathbb{E}_{a_t, s_{t+1}, \dots} [\mathcal{R}_t | s_t] \quad (8)$$

$$A^\pi(s_t, a_t) = Q^\pi(s_t, a_t) - V^\pi(s_t) \quad (9)$$

$$a_t^n \sim \pi^n(a_t^n | z_t^n), s_{t+1} \sim P(s_{t+1} | s_t, a_t), \forall t \geq 0 \quad (10)$$

预期的回报函数为

$$\mathcal{R}(\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^N) = \mathbb{E}_{s_0 \sim \rho_0(s_0)} \{V^\pi(s_0)\} \quad (11)$$

其中， $\rho_0(s_0)$ 是初始化状态 s_0 的分布。

最终的目标是寻求最优策略 π^* ，即

$$\pi^* = \arg \max \mathcal{R}(\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^N) \quad (12)$$

依据每个终端的本地观察做出决策，会导致过高的信令开销。使用单智能体强化学习训练集中式策略的复杂度较低，但是，随着海量用户数增加，策略 π 的作用空间呈指数增长，使算法很难获取最优解。因此，本文目标是通过多智能体集中学习，为每个终端确定分散策略，而不是集中策略。若确定了最优的分散策略，终端可以基于本地局部观察做出决策。

为了求解此优化问题，可以通过局部迭代上升来确定最佳联合策略。令 $\xi(\pi)$ 代表预期的回报函数 $\mathcal{R}(\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^N)$ ，于是，优化问题转换为求解 $\max \xi(\pi)$ 问题，设 π_0 为初始策略，由初始策略更新到策略，目标函数会随着迭代次数增加而增加，即 $\xi(\pi) > \xi(\pi_0)$ 。

$\xi(\pi)$ 的梯度为

$$\nabla_{\theta} \xi(\pi) = \sum_s \rho_{\pi}(s) \sum_a \nabla_{\theta} \pi(a | s) A^{\pi_0}(s, a) =$$

$$\sum_s \rho_{\pi}(s) \sum_a \pi(a | s) \sum_u \frac{\nabla_{\theta} \pi^n(a^n | z^n)}{\pi^n(a^n | z^n)} A^{\pi_0}(s, a) \quad (13)$$

当 $\theta = \theta_0$ 时，梯度转化为

$$\nabla_{\theta} \xi(\pi) |_{\theta=\theta_0} = \frac{1}{1-\gamma} \mathbb{E}_{\pi_0} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\nabla_{\theta} \pi^n(a^n | z^n)}{\pi_0^n(a^n | z^n)} A^{\pi_0}(s, a) \right\} \quad (14)$$

因此，优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{\theta} \mathbb{E}_{\pi_0} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\pi^n(a^n | z^n)}{\pi_0^n(a^n | z^n)} A^{\pi_0}(s, a) \right\} \\ \text{s.t.} \quad D_{\text{KL}}^{\max}(\pi_0^n \| \pi^n) \leq \sigma \end{aligned} \quad (15)$$

其中，约束条件中 $D_{\text{KL}}(\cdot \| \cdot)$ 函数可以度量 2 个概率分布的相似性。

为了求解上述优化问题，采用强化学习中的 PPO 算法，在多智能体的 PPO 中，每个智能体的学习信息可以由 RRU 向其他智能体广播，使用全局信息为每一个智能体训练分散策略。根据梯度上升法，优化问题的梯度为

$$\Delta \theta^n = \mathbb{E}_{\pi_0} \left\{ \nabla_{\theta^n} f(r(\theta^n), A^{\pi_0}(s, a)) \right\} \quad (16)$$

显然，策略梯度与联合政策函数有关，集中式评论家基于联合价值函数给出评价，分散式行动者根据本地观察做出决策，智能体做出接入选择网络的动作。虽然每个智能体有独立的评论家，但是他们基于相同的数据进行训练学习，所有的评论家也基于相同的状态值函数给出评价。在密集用户有接入需求时，由各个终端通过基于强化学习的智能合作接入方式，以全网 QoS 需求为目标完成接入策略。

在下行用户关联时，采用基于 MEC 框架的方法，使用户设备能够选择正确的网络，实现大吞吐量、广连接和高效率。当部署的网络包含多种无线接入技术、多频谱时，或者宏、微蜂窝联合部署时，用户关联方法变得更复杂。而基于定位信息^[128]或基于接收信号强度等传统方法无法支持密集连接。本文采用在 3GPP 中定义的 MEC 体系结构^[129]辅助基站进行下行密集用户关联，如图 3 所示。

图 3 中，3GPP 网络架构控制面由网络开放功能 (NEF, network exposure function)、统一数据管理功能 (UDM, unified data management)、策略控制功能 (PCF, policy control function)、统一数据仓库 (UDR, unified data repository)、网络仓储功能

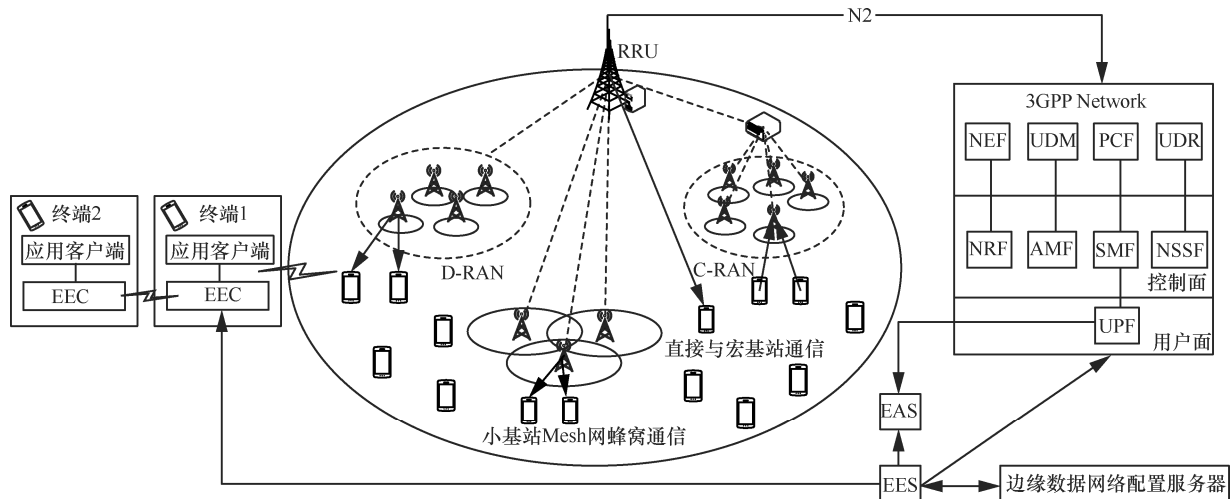


图3 基于 MEC 辅助的下行用户关联机制

(NRF, network repository function)、访问和移动性管理功能 (AMF, access and mobility management function)、会话管理功能 (SMF, session management function)、网络切片选择功能 (NSSF, network slice selection function) 组成。SMF 经过 N4 端口来控制用户面功能 (UPF, user port function), UPF 与边缘应用服务器 (EAS, edge application server) 之间建立 MEC 数据链路, EAS 用来提供 MEC 服务, 同时 EAS 与应用客户端之间也可以建立应用数据传输。边缘使能服务器 (EES, edge enabler server) 用来维护终端的数据信息, EES 中的数据集合一般包括终端的位置、身份 ID 或网络部署的信息等, EES 可以将获取的数据传递给终端中的边缘使能客户端 (EEC, edge enabler client)。EEC 协助终端中的应用程序使用 MEC 服务。EES 可以提供终端的异质需求、终端的数目信息、基站的负载情况和网络的容量信息等数据, 能满足海量密集终端设备的异质 QoS 需求, 关联到更合适的网络。不同终端的 EEC 可以互相建立 D2D 连接, 由于终端设备的密集部署, 不可能每个终端都在有接入需求的时候获得 EES 的数据集合。在这个情形下, EEC 之间可以通过 D2D 连接的方式获取所需的网络信息, 从而实现通信网络的密集接入。

面向密集终端请求接入网络的情形, 提出基于上下行分离网络架构的灵活接入方案, 综合考量了 D2D、NOMA 等具备密集连接特性和低时延保证技术的协作, 使网络更具灵活性。基于 MEC 辅助的下行终端用户关联, 为密集终端提供更合适的网络选择, 使具备异质需求特性的终端易于接入网络。

面向未来移动通信网络的架构、技术都不再是孤立存在的, 更立体化的架构和更灵活的方案体现了未来密集连接特性的大方向。

4 技术展望

目前, 关于密集连接的研究主要集中在二维度的平面网络、计算功能偏弱的通信系统、频谱资源不足或没有被充分利用的频段, 不能完全解决未来高密度移动网络发展带来的问题或瓶颈。未来移动通信网络将在全球范围内实现万亿级、全天候、智能化连接服务, 因此, 本文面向未来网络复杂性特征^[130], 对相应的关键技术及其发展给出预判。

4.1 网络架构立体化

受网络容量和覆盖范围的限制, 仅依靠地面通信系统无法在地球上的任何地方提供高质量无线接入服务^[131]。当务之急是开发新的网络架构, 以适应各种场景中具有不同 QoS 需求的服务和应用。空天地一体化网络 (SAGIN, space-air-ground integrated network)^[132]基于现有通信技术, 把天基网络、空基网络以及陆基网络连接成一个最大化容量、泛在密集连接和高致密频谱的立体化全覆盖空间, 以期提供全天候、无缝式、无死角的连接服务, 非常适合未来大规模组网或密集连接的应用场景。天基网络由卫星网络组成, 具有非常广的覆盖范围, 组网灵活性高。空基网络包括无人机、飞艇等空中平台, 空中平台可充当长距离通信的中继节点, 在天基和陆基网络间起到承上启下的作用, 促进陆地与非陆地网络的融合。与天基网络相比, 空基网络往返时延低, 具有快速部署和响应的特点。

陆基网络包括蜂窝网络、无线局域网、卫星地面站以及地面数据处理中心等, 将支持太赫兹频段, 但是覆盖范围有限。三层立体化网络既可以独立工作又可以互联互通, 在这样多种通信方式并存的立体化网络中协同传输意味着允许不同的通信系统动态地共享无线资源, 利用移动节点的分布式协作来扩大网络容量和资源利用率。目前, 空天地一体化通信系统尚未成熟, 面临的挑战性问题还有很多, 需设计统一的空口技术和核心网架构, 空天地之间不同的传输模式使三者之间的高效协同传输困难重重, 如何组建有效的空天地协同传输机制以提供高质量通信服务是当下需重点研究的课题。

4.2 通信计算一体化

未来通信网络的超大组网规模和超高连接密度, 是现代通信与网络技术无法企及的。为实现未来通信网络的众连接、高速率和大容量, 通信与计算不应该独立地进行, 也不应该局限于通信系统的智能单元内, 二者的融合应贯穿于基带、频带、空口乃至整个信道中。未来的超密集连接将导致收发系统的频带和空口负荷大大加重, 这就要求基带部分具有高效的计算能力, 实现快速、精准的编解码, 高精度的采样量化过程和适配性灵活的数字接口, 形成所谓智能或弹性基带处理架构。业界正在关注的几种新型调制或复用方式包括低峰均比调制方式、OFDM、正交时频空 (OTFS, orthogonal time frequency space)、高频谱效率频分复用 (SEFDM, spectrally efficient frequency division multiplexing), 都可以通过通信系统硬件独立实现, 但不能在实质上解决信道拥塞和干扰问题。而频带传输与计算的融合, 通过波形组合、灵活切换、分时控制、最优选择, 大大提升信道容量、传输质量和效率。空中计算提供了一种通信和计算一体化的架构^[132], 在不需恢复出每个节点个体数据的前提下, 通过所有节点的并发传输, 利用无线信道的叠加特性, 实现目标函数在空口信道中的直接运算, 计算传播途径、传播角度、所需功率、极化参数, 以及全双工通信自干扰消除策略。

超密集连接必然产生海量的数据, 要独立地为每个设备分配无线资源, 会导致过高的资源消耗, 这大大增加了无线网络的负担。目前, 基于传统通信理论设计的通信系统极大地限制了进一步的性能改进。因此, 有必要通过通信与计算融合技术来

提高网络的效率。由于未来的移动通信网络一定是感知、计算和通信三位一体的新型网络^[134], 基站必须处理密集终端设备的无线接入请求, 已有研究表明, 人工智能技术具有优化无线通信的潜力, 应用于无线通信的资源分配、信号处理、信道估计和收发器设计等问题^[135], 有望大幅降低复杂度。目前, 将人工智能模型训练过程扩展到边缘节点实现了边缘智能, 利用多个分布式终端设备采取协作的方式, 共同训练一个人工智能模型。单独的设备只需要根据自身的数据计算局部的模型, 最后融合全部设备的计算结果, 实现对全局模型的更新, 时效性更高。但是为边缘智能寻找统一的框架通常是不可行的, 需要根据任务类型和各参与节点的特点进行设计。Huang 等^[136]提出了基于深度学习的 NOMA、MIMO、毫米波通信框架, 然而许多技术的实现还处于起步阶段, 存在许多未解决的问题或瓶颈, 缺乏应用于未来移动通信的智能化通信与计算融合框架, 这是未来要解决的重点问题, 通信与计算融合技术将是下一代移动通信网络中的值得期待的发展方向。

4.3 频段向上延伸

目前的蜂窝网络运行在低于 6 GHz 的频段, 过于拥挤且带宽有限。为了实现频域的密集连接, 使用 mmWave^[137]甚至是太赫兹波段是有前景的选择^[138-140]。2020 年以后, mmWave 通信系统将彻底改变传统的无线通信系统, 也将彻底改变大数据和物联网环境下设备之间的交互方式^[139]。为了解决 mmWave 由于严重的传输损耗导致传输距离过短的问题, 其常与大规模 MIMO 技术结合, 甚至使用超过 1 000 个天线的超大规模 MIMO^[141]。因此, 在 mmWave 的应用中, 基站的 CSI 捕获和预编码变得更加复杂, 对此可运用基于深度学习的大规模 mmWave 与 MIMO 系统联合混合处理方案, 利用神经网络输出收发信机的混合处理矩阵, 将检测到的符号映射到原始比特^[142], 可以证明, 在 CSI 和信道不匹配的情况下, 此方案也能有效降低误码率。文献[143]提出了一种基于深度神经网络的预编码架构, 名为“ComcepNet”。该架构结合了复卷积块和初始网络的特点, 与目前的自动编码器网络相比, 在准确性和可实现的数据方面具有优越的性能。利用 mmWave 频段的巨大可用带宽和大规模 MIMO 可实现高复用增益, 显著提高用户吞吐量、频谱效率、能源效率以及增加移动网络容量, 具备

支持未来密集终端设备接入的潜力。

2019年年初,美国联邦通信委员会开放了太赫兹的频段(0.1~10 THz),这将能获得比 mmWave 更加丰富的带宽资源,可以为扩频和复用技术提供更加有力的支持^[144],也可以为广连接和大容量传输打开了一条基础通道,更能支持众连接、大容量的密集终端通信。未来移动通信系统中应用太赫兹的挑战有很多,诸如路径损耗大、相位噪声高、调制和复用难度大等。由于太赫兹比 mmWave 的路径损耗更高,所需的天线数量更多,太赫兹通信技术与其他技术相结合更能够发挥其技术优势,如太赫兹和大规模 MIMO 技术相结合,利用大规模 MIMO 减轻信道多普勒效应和时延色散效应,增强太赫兹频段的连通性。全向组网技术是节点利用全向天线完成全方向的邻居发现,但是易受干扰,能耗较高,而太赫兹通信中使用定向天线完成组网,并要求发射天线具有高增益、接收天线具有高灵敏度,进一步研究波束成形与调控技术,快速发现满足传输条件的波束链路,运用通信与计算融合技术及人工智能理论,实现波束跟踪及链路重建,提高网络吞吐量和降低能耗,构建超广覆盖和高密集连接通信体系。此外,未来需要适合太赫兹波段的高精度宽带混频器、高效率功率放大器和高灵活性的天线设备,以及更加高效的资源管理技术,与新兴技术有效结合,共同保障太赫兹技术发挥技术优势,完成密集终端的高质量通信。

4.4 频谱资源共享

毋庸置疑,网络连接的密度越大,频谱资源越稀缺,运用区块链技术,能在一定程度上解决频谱资源稀缺问题。区块链是一种按照时间顺序将数据

区块以链条式结构组织,并以密码学方式保证的一种技术体系。区块链上的数据具有公开透明、安全、可追溯、不可篡改等特点,在分布式点对点(P2P, peer-to-peer)服务平台上建立对等实体之间的交易信任。此项技术可以在提升未来移动通信网络的频谱、数据、设备等资源利用率的同时,实现资源动态共享。区块链的工作过程如图4所示^[145]。

我国工业和信息化部启动了区块链-5G项目,允许中国移动、中国联通和中国电信在全国现有5G平台上部署区块链。区块链与5G结合的主要动机源于区块链在解决5G网络在安全、隐私、网络和服务管理方面的挑战有巨大优势^[145]。随着用户数目不断倍增,无论何时何地,海量用户都有接入需求,无线网络中的频谱稀缺阻碍了吞吐量和服务质量的快速提高,因此,迫切地需要更多频谱或者更有效地利用频谱资源。有研究者提出引入次级用户,次级用户可以监控频谱,在频谱空闲时传输数据^[146]。但是,这种情况下的频谱共享会引起安全问题,与传统的频谱管理方案相比,区块链给5G网络带来了更好的解决方案。区块链通过表7所示的性能优势来支持高效频谱管理。

2018年移动世界大会上,美国联邦通信委员会(FCC, Federal Communications Commission)委员在展望6G的演讲中提到,网络不断地迈向密集化,基于区块链的动态频谱共享技术是趋势^[147],这不但可以增加接入等级和接入用户,还可以提高频谱利用率,实现网络运营商之间的共建共享、密集终端设备间租赁共享、未来天地一体化网络频谱共享、数据共享、资源共享。文献[148]较好地总结了区块链技术在频谱共享中的潜在应用。

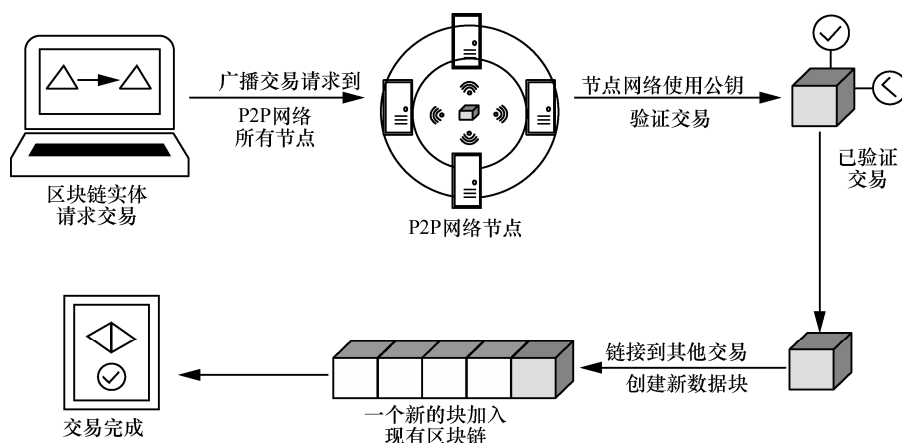


图4 区块链的工作过程

表 7 区块链支持频谱共享的性能优势

优势	如何支持高效频谱共享
去中心化	区块链不需要任何信任机构背书, 减少了频谱共享网络开销, 提高了系统的完整性和隐私性
透明化	频谱用户和服务提供商的交易记录在分布式区块链账本上, 基于区块链的频谱共享可更好地了解频谱使用情况
不可篡改	区块链分类账可以很好地抵抗攻击或恶意用户造成的修改, 这也确保了频谱服务的可靠性, 提高了网络实施的准确性
可用性	区块链向所有实体广播服务信息, 网络参与者都可以访问频谱共享数据库
非许可	没有单一可信实体作为控制网络的中央机构, 新用户可不需要寻求批准地加入系统中, 灵活性高
安全性	区块链具有强大的安全能力抵御拒绝服务风险和内部攻击

区块链在应用于移动通信系统时, 也面临一些瓶颈, 由于数据块大小限制, 将事物加入链中会有很长的排队时间, 当数据块生成时间快速增加时, 系统的吞吐量会降低。而且随着终端设备数量日益庞大, 区块链处理设备产生了海量数据, 每个节点都必须处理、存储交易数据副本^[149], 这造成了区块链网络的存储效率低下、计算负担过重等问题。因此, 必须设计针对具体场景的共识协议、大型数据库划分为数据碎片的分片技术, 高效的存储技术, 以及将区块链与边缘计算、人工智能等新兴技术结合, 实现跨网跨域、安全可靠、智能高效的互联互通。

5 结束语

随着各种服务应用的飞速发展, 驱动了人、物、空间之间的互联互通。本文围绕未来移动网络密集连接问题展开, 总结了对其发展有支撑作用的关键技术, 分别从网络架构、传输技术和接入技术 3 个方面对研究进展进行了总结与分析; 并考虑到上下行覆盖不对称问题, 提出了基于上下行分离的密集终端接入方案。上行采用联合网络与用户侧接入选择策略, 应用 DRL 技术, 迎合了通信发展智能化新趋势。下行利用 MEC 辅助基站进行用户关联, 降低时延且满足不同用户的异质 QoS 需求。在此基础上, 根据大规模组网以及密集连接未来发展需求, 对将涉及的关键技术给出前瞻性描述。未来移动网络应拥有更立体化的网络架构、高度协同融合的通信与计算能力、更加丰富且可充分利用的频谱资源, 共同为大规模组网以及密集终端接入网络提供有力保证。

参考文献:

- [1] 钱志鸿, 田春生, 郭银景, 等. 智能网联交通系统的关键技术与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 2-19.
QIAN Z H, TIAN C S, GUO Y J, et al. The key technology and development of intelligent and connected transportation system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(1): 2-19.
- [2] IMRAN A, ZOHA A, ABU-DAYYA A. Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [3] BOCKELMANN C, PRATAS N K, WUNDER G, et al. Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 28969-28992.
- [4] WU Y P, GAO X Q, ZHOU S D, et al. Massive access for future wireless communication systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 148-156.
- [5] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(5): 551-563.
- [6] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [7] LIU G Y, HUANG Y H, LI N, et al. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030[J]. China Communications, 2020, 17(9): 92-104.
- [8] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.
QIAN Z H, WANG Y J. IoT technology and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023-1029.
- [9] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [10] DHAR ROY S, VAMSHIDHAR REDDY S R. Signal strength ratio based vertical handoff decision algorithms in integrated heterogeneous networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 77(4): 2565-2585.
- [11] LIN Y C, WEI Y. Optimizing user association and frequency reuse for heterogeneous network under stochastic model[C]//2013 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 2045-2050.
- [12] 魏淑芝, 朱琦. 基于网络选择的视频通信带宽博弈算法[J]. 通信学报, 2015, 36(2): 216-224.
WEI S Z, ZHU Q. Bandwidth allocation games based on network selection for video communication[J]. Journal on Communications, 2015, 36(2): 216-224.
- [13] AHUJA K, SINGH B, KHANNA R. Network selection based on weight estimation of QoS parameters in heterogeneous wireless multimedia networks[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 77(4): 3027-3040.
- [14] THUMTHAWATWORN T, TILLAPART P, SANTIPRABHOB P. Adaptive multi-fuzzy engines for handover decision in heterogeneous wireless networks[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 93(4):

- 1005-1026.
- [15] WU J S, HUEY R S. Improved joint radio resource management usage grey fuzzy control in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of internet technology*, 2015, 16(5): 777-788.
- [16] MA D, MA M D. Proactive load balancing with admission control for heterogeneous overlay networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2013, 13(18): 1671-1680.
- [17] SALIH Y K, HANG SEE O, IBRAHIM R W, et al. A novel noncooperative game competing model using generalized simple additive weighting method to perform network selection in heterogeneous wireless networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2015, 28(6): 1112-1125.
- [18] GOUDARZI S, HASSAN W H, ANISI M H, et al. MDP-based network selection scheme by genetic algorithm and simulated annealing for vertical-handover in heterogeneous wireless networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 92(2): 399-436.
- [19] LIU C J, XIAO L. Interference precancellation for resource management in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(1): 138-152.
- [20] HE A Q, WANG L F, CHEN Y, et al. Uplink interference management in massive MIMO enabled heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(5): 560-563.
- [21] SHOUKRY H, MYSORE BALASUBRAMANYA N, VUPPALA S, et al. Performance analysis of a wireless backhaul in a three-tier hybrid network with directional antennas[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18332-18344.
- [22] YOUNIS A, POMPILI D. PhD forum: resource allocation and task offloading in cloud-assisted wireless networks[C]//2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks". Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [23] ZHANG N, CHENG N, GAMAGE A T, et al. Cloud assisted HetNets toward 5G wireless networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(6): 59-65.
- [24] ZHANG S, WU Y Q, ZHOU S, et al. Traffic-aware network planning and green operation with BS sleeping and cell zooming[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2014, 97(11): 2337-2346.
- [25] MUSTAFA H A U, IMRAN M A, SHAKIR M Z, et al. Separation framework: an enabler for cooperative and D2D communication for future 5G networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 419-445.
- [26] 钱志鸿, 王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述[J]. *通信学报*, 2016, 37(7): 1-14.
QIAN Z H, WANG X. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(7): 1-14.
- [27] FENG W J, WANG Y F, YANG L. Resource allocation method of device-to-device communication[J]. *Communications and Network*, 2013, 5(3): 338-343.
- [28] HAYAT O, NGAH R, MOHD HASHIM S Z. Device discovery for D2D communication using belief space search in dense area[C]//2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2019: 401-405.
- [29] CAO W, FENG G, QIN S, et al. D2D communication assisted traffic offloading for massive connections in HetNets[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [30] WANG Q, LAI C L, DONG Y, et al. Joint user clustering and resource allocation for device-to-device communication underlying MU-MIMO cellular networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1): 1-17.
- [31] SHALMASHI S, BJÖRNSSON E, KOUNTOURIS M, et al. Energy efficiency and sum rate tradeoffs for massive MIMO systems with underlaid device-to-device communications[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016(1): 1-18.
- [32] LIN J R, SHI Q J, LI Q, et al. Joint mode selection and transceiver design for device-to-device communications underlying multi-user MIMO cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(6): 3312-3328.
- [33] ZHAO J J, LIU Y W, CHAI K K, et al. NOMA-based D2D communications: towards 5G[C]//2016 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [34] ALEMAISHAT S, SARAEREH O A, KHAN I, et al. An efficient resource allocation algorithm for D2D communications based on NOMA[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 120238-120247.
- [35] LI J G, LI X M, WANG A H, et al. Beam-space MIMO-NOMA for millimeter-wave broadcasting via full-duplex D2D communications[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2020, 66(2): 545-554.
- [36] ZHAO Z Y, PENG M G, DING Z G, et al. Cluster content caching: an energy-efficient approach to improve quality of service in cloud radio access networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(5): 1207-1221.
- [37] MA L Y, ZHANG H X, LI T T, et al. Deep learning and social relationship based cooperative caching strategy for D2D communications[C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [38] SADEGHI A, SHEIKHOLESLAMI F, GIANNAKIS G B. Optimal and scalable caching for 5G using reinforcement learning of space-time popularities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(1): 180-190.
- [39] ZHANG L, XIAO M, WU G, et al. A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(5): 44-51.
- [40] ZHANG X, CHENG W C, ZHANG H L. Full-duplex transmission in phy and mac layers for 5G mobile wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(5): 112-121.
- [41] 吴浩洋, 王韬, 焦秉立. 基于GRT平台的全双工WiFi设计与实现[J]. *中兴通讯技术*, 2016, 22(3): 31-35.
WU H Y, WANG T, JIAO B L. Full-duplex WiFi design and implementation based on GRT platform[J]. *ZTE Technology Journal*, 2016, 22(3): 31-35.
- [42] 徐强, 全欣, 潘文生, 等. 同时同频全双工LTE射频频干扰抑制能力分析及实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(3): 662-668.
XU Q, QUAN X, PAN W S, et al. Analysis and experimental verification of rf Self-interference cancellation for Co-time Co-frequency Full-duplex lte[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(3): 662-668.
- [43] ZHANG Z S, LONG K P, VASILAKOS A V, et al. Full-duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(7): 1369-1409.
- [44] CHOI J I, JAIN M, SRINIVASAN K, et al. Achieving single channel, full duplex wireless communication[C]//Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Network-

- ing. New York: ACM Press, 2010: 1-12.
- [45] 王俊, 赵宏志, 马万治, 等. 同时同频全双工宽带射频自干扰抵消性能分析[J]. 通信学报, 2016, 37(9): 121-130.
WANG J, ZHAO H Z, MA W Z, et al. Performance analysis of broadband self-interference cancellation at RF domain in co-frequency co-time full duplex systems[J]. Journal on Communications, 2016, 37(9): 121-130.
- [46] SAHAI A, PATEL G, SABHARWAL A. Pushing the limits of Full-duplex: design and Real-time implementation[J]. arXiv Preprint: arXiv: 1107.0607, 2011.
- [47] MA J, LI G Y, ZHANG J Y, et al. A new coupling channel estimator for cross-talk cancellation at wireless relay stations[C]//2009 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [48] KORPI D, CHOI Y S, HUUSARI T, et al. Adaptive nonlinear digital self-interference cancellation for mobile inband full-duplex radio: algorithms and RF measurements[C]//2015 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [49] HUA Y B, LIANG P, MA Y M, et al. A method for broadband full-duplex MIMO radio[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(12): 793-796.
- [50] YANG B, DONG Y, YU Z, et al. An RF self-interference cancellation circuit for the full-duplex wireless communications[C]//2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1048-1051.
- [51] YANG X B, BABAKHANI A. A full-duplex single-chip transceiver with self-interference cancellation in 0.13 μ m SiGe BiCMOS for electron paramagnetic resonance spectroscopy[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(10): 2408-2419.
- [52] EL SAYED A, MISHRA A K, AHMED A H, et al. A Hilbert transform equalizer enabling 80 MHz RF self-interference cancellation for full-duplex receivers[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(3): 1153-1165.
- [53] ZHANG T, SU C X, NAJAFI A, et al. Wideband dual-injection path self-interference cancellation architecture for full-duplex transceivers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(6): 1563-1576.
- [54] DUARTE M, SABHARWAL A, AGGARWAL V, et al. Design and characterization of a full-duplex multi-antenna system for WiFi networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(3): 1160-1177.
- [55] KIM J, SHAMAILEH K, ADUSUMILLI S, et al. Digital interference cancellation for multimedia transmission in full duplex communication link[C]//2013 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [56] HU C C, LIU G F, CHEN B H. Joint relay/antenna selection and precoding design for two-way MIMO amplify-and-forward relaying systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7): 4854-4864.
- [57] KENTARO N. Novel technologies using massive MIMO transmission toward 5G and its beyond systems[C]//International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [58] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [59] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L, HOYDIS J, et al. Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: is massive MIMO the answer?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3059-3075.
- [60] BJÖRNSON E, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MIMO: ten myths and one critical question[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 114-123.
- [61] BJÖRNSON E, LARSSON E G, DEBBAH M. Massive MIMO for maximal spectral efficiency: how many users and pilots should be allocated?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1293-1308.
- [62] YANG H, MARZETTA T L. Massive MIMO with max-Min power control in line-of-sight propagation environment[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(11): 4685-4693.
- [63] JI H, KIM Y, LEE J, et al. Overview of full-dimension MIMO in LTE-advanced pro[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 176-184.
- [64] HARRIS P, HASAN W B, MALKOWSKY S, et al. Serving 22 users in real-time with a 128-antenna massive MIMO testbed[C]//2016 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems. Piscataway: IEEE Press, 2016: 266-272.
- [65] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [66] HAN Y, RAO B D, LEE J. Massive uncoordinated access with massive MIMO: a dictionary learning approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 1320-1332.
- [67] LEE B M, YANG H. Massive MIMO for industrial Internet of Things in cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2641-2652.
- [68] DENG R C, JIANG Z Y, ZHOU S, et al. How often should CSI be updated for massive MIMO systems with massive connectivity?[C]//2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [69] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [70] GE L J, ZHANG Y, CHEN G J, et al. Compression-based LMMSE channel estimation with adaptive sparsity for massive MIMO in 5G systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4): 3847-3857.
- [71] WEI X, PENG W, CHEN D, et al. Joint channel parameter estimation in multi-cell massive MIMO system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5): 3251-3264.
- [72] WU L, ZHANG Z C, DANG J, et al. Enhanced time-shifted pilot based channel estimation in massive MIMO systems with finite number of antennas[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 222-227.
- [73] UPADHYA K, VOROBYOV S A, VEHKAPERÄ M. Superimposed pilots are superior for mitigating pilot contamination in massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(11): 2917-2932.
- [74] GAO J Y, WU Y P, WEI F. Random pilot and data access for massive MIMO spatially correlated Rayleigh fading channels[C]//2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019:

- 1-6.
- [75] ZHU X D, WANG Z C, DAI L L, et al. Smart pilot assignment for massive MIMO[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1644-1647.
- [76] JOSE J, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2640-2651.
- [77] ASHIKHMIN A, LI L B, MARZETTA T L. Interference reduction in multi-cell massive MIMO systems with large-scale fading precoding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2018, 64(9): 6340-6361.
- [78] NAM J, ADHIKARY A, AHN J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing: opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 876-890.
- [79] BAZZI S, XU W. Downlink training sequence design for FDD multiuser massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(18): 4732-4744.
- [80] KUO P H, KUNG H T, TING P G. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays[C]//2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 492-497.
- [81] WEN C K, SHIH W T, JIN S. Deep learning for massive MIMO CSI feedback[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(5): 748-751.
- [82] NAKAMURA T, NAGATA S, BENJEBBOUR A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(2): 98-105.
- [83] SHAIK Z H, BJÖRNSSON E, LARSSON E G. Cell-free massive MIMO with radio stripes and sequential uplink processing[C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [84] 王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向5G的大规模天线无线传输理论与技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(1): 3-21.
WANG D M, ZHANG Y, WEI H, et al. An overview of transmission theory and techniques of large-scale antenna systems for 5G wireless communications[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(1): 3-21.
- [85] 周泉, 范平志, 郝莉. 基于DFT-SV-OFDM的自适应多速率DFT加扰矢量码分址系统研究[J]. *通信学报*, 2017, 38(9): 46-54.
ZHOU Q, FAN P Z, HAO L. DFT-SV-OFDM based adaptive multi-rate DFT scrambling vector code division multiple access[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(9): 46-54.
- [86] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74-81.
- [87] SHIRVANIMOGHADDAM M, CONDOLOUCI M, DOHLER M, et al. On the fundamental limits of random non-orthogonal multiple access in cellular massive IoT[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2238-2252.
- [88] DING Z G, LEI X F, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [89] WEI Z Q, NG D W K, YUAN J H, et al. Optimal resource allocation for power-efficient MC-NOMA with imperfect channel state information[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(9): 3944-3961.
- [90] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y, et al. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]//2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2013: 770-774.
- [91] TAKEDA T, HIGUCHI K. Enhanced user fairness using non-orthogonal access with SIC in cellular uplink[C]//2011 IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [92] HOSHYAR R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1616-1626.
- [93] DAI X M, CHEN S Z, SUN S H, et al. Successive interference cancellation amenable multiple access (SAMA) for future wireless communications[C]//IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 222-226.
- [94] LI A X, LAN Y, CHEN X H, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G[J]. *China Communications*, 2015, 12: 28-37.
- [95] YAMAMOTO K, SAITO Y, HIGUCHI K. System-level throughput of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink when channel estimation error exists[C]//2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [96] NONAKA N, BENJEBBOUR A, HIGUCHI K. System-level throughput of NOMA using intra-beam superposition coding and SIC in MIMO downlink when channel estimation error exists[C]//2014 IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 202-206.
- [97] LI P R, DING Z, FENG K T. Enhanced receiver based on FEC code constraints for uplink NOMA with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4790-4802.
- [98] ASSAF T, AL-DWEIK A, MOURSI M S E, et al. NOMA receiver design for delay-sensitive systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, PP(99): 1-12.
- [99] KARA F, KAYA H K. Error probability analysis of non-orthogonal multiple access with channel estimation errors[C]//2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [100] BALOGUN M B, TAKAWIRA F, OYERINDE O O. Weighted least square based iterative channel estimation for uplink NOMA-OFDM systems[C]//2019 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [101] YANG Z, DING Z G, FAN P Z, et al. A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(11): 7244-7257.
- [102] KAVLAK K S, ÇELEBI M E. Optimal fair resource allocation for downlink NOMA systems[C]//2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [103] DAI L L, WANG B C, DING Z G, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2294-2323.
- [104] WEI F, CHEN W, WU Y P, et al. Message-passing receiver design for

- joint channel estimation and data decoding in uplink grant-free SCMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(1): 167-181.
- [105]RAZAVI R, HOSHYAR R, IMRAN M A, et al. Information theoretic analysis of LDS scheme[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(8): 798-800.
- [106]AL-IMARI M, XIAO P, IMRAN M A, et al. Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks[C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 781-785.
- [107]LI X H, ZHU Q, WANG X B. Privacy-aware crowdsourced spectrum sensing and multi-user sharing mechanism in dynamic spectrum access networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 32971-32988.
- [108]TAO Y Z, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. *China Communications*, 2015, 12(10): 1-15.
- [109]DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. A fast convergence multiuser detection scheme for uplink SCMA systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4): 388-391.
- [110]DU Y, DONG B H, CHEN Z, et al. Shuffled multiuser detection schemes for uplink sparse code multiple access systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1231-1234.
- [111]LU L, CHEN Y, GUO W T, et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation[J]. *China Communications*, 2015, 12: 38-48.
- [112]YUAN Q, WANG Z Y, ZHANG X Y, et al. Sparse pilot matrix design for uplink grant-free SCMA system[C]//2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China. Piscataway: IEEE Press, 2019: 19-24.
- [113]MIUCCIO L, PANNO D, RIOLO S. Joint congestion control and resource allocation for massive MTC in 5G networks based on SCMA[C]//2019 15th International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [114]DING Z G, DAI L L, POOR H V. MIMO-NOMA design for small packet transmission in the Internet of Things[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1393-1405.
- [115]AL-HUSSAIBI W A, ALI F H. Efficient user clustering, receive antenna selection, and power allocation algorithms for massive MIMO-NOMA systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 31865-31882.
- [116]ROBERTS L G. ALOHA packet system with and without slots and capture[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1975, 5(2): 28-42.
- [117]LIANG Y, NI Z Y, KUANG L L. An enhanced random access scheme: multi-power contention resolution diversity slotted aloha[C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 120-125.
- [118]ALVI S, DURRANI S, ZHOU X Y. Enhancing CRDSA with transmit power diversity for machine-type communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7790-7794.
- [119]MOON S, LEE J W. Performance study of repetition-based grant-free schemes in the mMTC scenario[C]//2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-2.
- [120]SRIVATSA C R, MURTHY C R. Throughput analysis of PDMA/IRSA under practical channel estimation[C]//2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [121]SAHA S, SUKUMARAN V B, MURTHY C R. On the minimum average age of information in IRSA for grant-free mMTC[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, PP(99): 1..
- [122]PAOLINI E, STEFANOVIC C, LIVA G, et al. Coded random access: applying codes on graphs to design random access protocols[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(6): 144-150.
- [123]MA G Y, AI B, WANG F G, et al. Joint design of coded tandem spreading multiple access and coded slotted ALOHA for massive machine-type communications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(9): 4064-4071.
- [124]PENG M G, LIU Y, WEI D Y, et al. Hierarchical cooperative relay based heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3): 48-56.
- [125]田辉, 范绍帅, 吕昕晨, 等. 面向 5G 需求的移动边缘计算[J]. *北京邮电大学学报*, 2017, 40(2): 1-10.
TIAN H, FAN S S, LYU X C, et al. Mobile edge computing for 5G requirements[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40(2): 1-10.
- [126]朱近康. 知识+数据驱动学习: 未来网络智能的基础[J]. *中兴通讯技术*, 2020, 26(4): 46-49.
ZHU J K. Knowledge-and-data driven learning: foundation of future network intelligence[J]. *ZTE Technology Journal*, 2020, 26(4): 46-49.
- [127]GUO D L, TANG L, ZHANG X G, et al. Joint optimization of handover control and power allocation based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 13124-13138.
- [128]KUBONIWA J, MIYAKE Y, KAMEDA S, et al. A novel cell selection scheme using positioning information for heterogeneous wireless system[C]//2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2204-2208.
- [129]3GPP. Study on application architecture for enabling edge applications: TR. 23. 758[S]. 2019.
- [130]张朝阳. 5G 大规模接入技术: 如何应对差异化服务的挑战[J]. *中兴通讯技术*, 2017, 23(3): 50-52.
ZHANG Z Y. Massive access in 5G: challenges and solutions for differentiated service[J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(3): 50-52.
- [131]LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [132]张平, 秦智超, 陆洲. 天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑[J]. *中兴通讯技术*, 2016, 22(4): 24-28.
ZHANG P, QIN Z C, LU Z. The space wideband backbone interconnected system in the integrated space and terrestrial information network[J]. *ZTE Technology Journal*, 2016, 22(4): 24-28.
- [133]CHEN L, ZHAO N, CHEN Y F, et al. Over-the-air computation for cooperative wideband spectrum sensing and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10603-10614.
- [134]ZHU G X, HUANG K B. MIMO over-the-air computation for high-mobility multimodal sensing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6089-6103.
- [135]WANG T Q, WEN C K, WANG H Q, et al. Deep learning for wireless

- physical layer: Opportunities and challenges[J]. China Communications, 2017, 14(11): 92-111.
- [136]HUANG H J, GUO S, GUI G, et al. Deep learning for physical-layer 5G wireless techniques: opportunities, challenges and solutions[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 214-222.
- [137]AGRAWAL S K, KAPIL S. 5G millimeter wave (mmWave) communications[C]//International Conference on Computing for Sustainable Global Development. Piscataway: IEEE Press, 2016: 3630-3634.
- [138]ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106-113.
- [139]HEATH R W, GONZÁLEZ-PRELCIC N, RANGAN S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 436-453.
- [140]RAPPAPOORT T S, XING Y C, MACCARTNEY G R, et al. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—with a focus on propagation models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6213-6230.
- [141]卢安安, 高西奇. 大规模 MIMO 传输技术研究与展望[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 186-192.
- LU A A, GAO X Q. Prospects and overview of massive MIMO transmission[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 186-192.
- [142]DONG P H, ZHANG H, LI G Y. Framework on deep learning-based joint hybrid processing for mmWave massive MIMO systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 106023-106035.
- [143]SIDHARTH C, HIREMATH S M, PATRA S K. Deep Learning based Hybrid Precoding for mmWave Massive MIMO system using ComcepNet[C]//2020 International Conference on Communication and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1317-1321.
- [144]CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. China Communications, 2019, 16(2): 1-35.
- [145]NGUYEN D C, PATHIRANA P N, DING M, et al. Blockchain for 5G and beyond networks: a state of the art survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 166: 102693.
- [146]ZHANG L, XIAO M, WU G, et al. A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 44-51.
- [147]蒋宇娜, 葛晓虎, 杨旸, 等. 面向 6G 的区块链物联网数据共享和存储机制[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 48-58.
- JIANG Y N, GE X H, YANG Y, et al. 6G oriented blockchain based Internet of things data sharing and storage mechanism[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 48-58.
- [148]WEISS M B H, WERBACH K, SICKER D C, et al. On the application of blockchains to spectrum management[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(2): 193-205.
- [149]WANG W B, HOANG D T, HU P Z, et al. A survey on consensus mechanisms and mining strategy management in blockchain networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 22328-22370.

[作者简介]



钱志鸿（1957—），男，吉林长春人，博士，吉林大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线网络与通信理论，包括 WSN 和 IoT 的密集部署问题，基于 D2D、异构网技术的未来移动通信网络的移动性和大规模接入问题。



肖琳（1997—），女，黑龙江伊春人，吉林大学硕士生，主要研究方向为 5G 通信中的关键技术，具体包括 D2D 通信和非正交多址接入技术。



王雪（1984—），女，吉林白山人，博士，吉林大学副教授，主要研究方向为 5G 通信中的关键技术，具体包括 D2D 通信的模式选择、同步技术及物联网技术。