



研究与开发

6G 通感算智融合技术体系及关键技术研究

刘建军^{1,2}, 佟舟^{1,2}, 施南翔¹, 李娜^{1,2}, 刘光毅^{1,2}

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;
2. 中关村泛联移动通信技术创新应用研究院, 北京 100088)

摘要: 相比5G, 6G将超越传统单一的通信功能, 深度融合通信、感知、计算、人工智能 (artificial intelligence, AI)、大数据、安全等跨领域技术, 构建一切皆服务 (everything as a service, XaaS) 的新一代移动信息网络。立足6G愿景需求与设计目标, 系统论述6G通感算智融合、空天地一体全域覆盖的技术体系, 并在此基础上阐述6G关键技术的系统设计, 旨在为6G技术研发和标准制定提供参考。

关键词: 6G; 通感算智融合; 空天地一体; 技术体系

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX260068

Research on the technical system and key technologies of integrated communication, sensing, computing, and intelligence for 6G

Liu Jianjun^{1,2}, Tong Zhou^{1,2}, Shi Nanxiang¹, Li Na^{1,2}, Liu Guangyi^{1,2}

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China
2. ZGC Institute of Ubiquitous-X Innovation and Applications, Beijing 100088, China

Abstract: Compared with 5G, 6G will go beyond the traditional communication function and deeply integrate cross-domain technologies such as communication, sensing, computing, artificial intelligence (AI), big data, and security to build a new generation of mobile information network featuring everything as a service (XaaS). Based on the vision requirements and design objectives of 6G, a technical framework integrating communication, sensing, computing, and intelligence with ubiquitous space-air-ground integrated coverage was systematically articulated. On this basis, the system design of key 6G technologies was elaborated, aiming to provide a reference for 6G technology research and standardization.

Key words: 6G, integration of communication-sensing-computing and intelligence, space-air-ground integration, technical system

0 引言

6G是继5G实现“万物互联”后, 为适应经济

社会“数字孪生、智慧泛在”发展需求, 通过新型网络架构、多维网络能力打造的新一代移动信息网络^[1]。它将全方位推动经济社会迈向虚实结合的数

收稿日期: 2026-01-25; 修回日期: 2026-04-06

通信作者: 刘建军, liujianjun@chinamobile.com

基金项目: 国家重点研发计划专项 (No. 2024YFE0200600)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFE0200600)



字孪生世界。当前, 6G 发展已进入标准化关键阶段, 技术主导权的竞争日益激烈, 跨领域的技术融合已成为业界普遍共识。构建 6G 技术体系, 将为全局最优的 6G 系统设计和标准制定提供技术指引。

当前, 全球主要国家正积极推进 6G 技术研发和战略布局。美国在机器学习、数据分析和智能算法等领域具备较强技术积累, 并拥有英伟达等领先的图形处理器 (graphics processing unit, GPU) 制造商。2025 年 3 月, 英伟达宣布组建“6G 开发者计划”, 联合 T-Mobile、思科等企业, 基于 GPU 开展人工智能 (artificial intelligence, AI) 原生 6G 无线网络的硬件、软件及架构研发, 力求实现“核心技术+生态控制”。欧盟国家启动了“Hexa-X- II”、REINDEER、RISE-6G 等多个 6G 研发项目, 系统布局 6G 需求及用例、网络架构、关键技术、试验平台的研发^[2]。然而, 德国、意大利等部分欧洲国家的电信运营企业由于 5G 部署相对滞后、发展未达预期, 主张基于 5G 迭代演进以控制网络整体成本。日本、韩国整体上对 6G 发展持积极态度。日本企业主导全光网联盟 (innovative optical and wireless network, IOWN), 积极研发面向开放、云化网络的开放无线接入网 (open radio access network, O-RAN) 产品; 韩国则拥有核心网、基站、终端、芯片及集成电路制造等完备的产业链。中国以新型举国体制统筹推进 6G 创新布局, 重点布局通感算智融合等跨领域技术创新, 在新型网络架构、智简网络、通信与感知融合、超大规模天线、智能超表面等 6G 关键技术方向上形成了一定的领先优势。

2023 年 6 月, 国际电信联盟无线电通信部门 (International Telecommunications Union-Radio Communication Sector, ITU-R) 如期完成了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》(以下简称《6G 框架建议书》), 全面描绘了 6G 目标与演进趋势^[3]。中国作为核心贡献方, 推动 ITU 确定了 6G 的六大典型场景, 如图 1 所示。相

较于 5G, 6G 可实现“三个增强、三个一体”。一方面, 6G 将在 5G 基础上大幅提升网络性能, 即在沉浸式通信、超大规模连接、超可靠低时延通信三大能力上, 相较 5G 有望实现性能成倍提升。另一方面, 6G 将超越传统的通信范畴, 构建融合通信、感知、计算、AI、大数据、安全等多维能力的服务体系, 实现从移动通信网络向移动信息网络的重大转变, 并呈现“三个一体”的发展趋势: 一是空天地一体 (泛在连接)^[4], 即整合空基、天基与地基网络资源, 将信息服务由“二维”地面, 拓展至陆海空天“三维”空间, 开辟经济社会发展的新疆域; 二是通信与感知一体 (通信与感知融合)^[5-6], 使规模部署的通信基础设施具备雷达感知功能, 成为连通现实世界与数字世界的重要桥梁; 三是通信与智能一体 (通信与 AI 融合)^[7], 即通信网络与 AI 深度融合、双向赋能, 从数据承载向支撑智能交互升级, 实现网络自优化与应用智能化。此外, 《6G 框架建议书》贯穿六大典型场景, 明确了 6G 的设计原则, 包括: 可持续性 (高效能、绿色低碳、全生命周期环保)、泛在智能 (AI 嵌入网络、端边云协同)、安全和弹性 (内生安全、抗攻击、高可靠)、连接未连接者 (普惠覆盖、人人可及)。

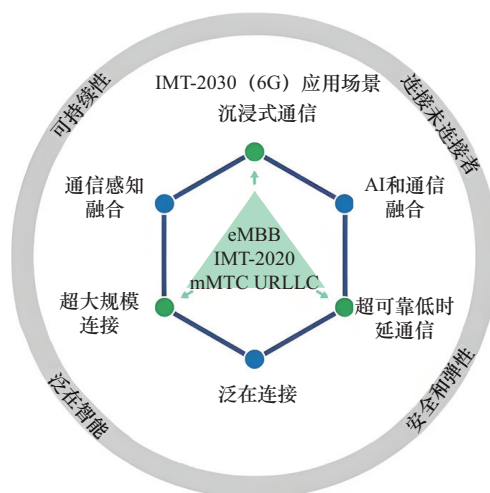


图1 6G 的六大典型场景^[3]

1 6G 技术需求:基础连接能力+新增能力

ITU-R《6G 框架建议书》定义了 6G 的十五大关键能力,是在 5G 九大传统关键能力基础上的进一步提升和拓展。这些能力具体可以分为两类:一是 9 项 5G 基础连接能力的提升,包括峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量密度、连接数密度、移动性、时延、可靠性、安全隐私弹性;二是在 5G 现有能力的基础上新增了六项能力,包括感知指标、AI 指标、可持续性、覆盖能力、定位精度与互操作。

基于 6G 的十五大关键能力,ITU-R 于 2026 年 2 月正式发布了 6G 技术的最低性能要求^[8],本文具体从两方面进行解读。一方面,6G 基础连接能力相较 5G 将实现大幅提升。例如,移动性,即能够实现规定服务质量(quality of service, QoS)下的终端最大移动速度,由 500 km/h 提升至 500~1 000 km/h;平均频谱效率、边缘频谱效率、用户体验速率等指标较 5G 提升 3 倍。6G 基础连接能力性能指标要求见表 1。另一方面,6G 针对通信与感知一体(通信与感知融合)、通信与智能一体(通信与 AI 融合)、空天地一体(泛在

连接)3 个新场景定义了新增能力指标,见表 2。例如,相比 5G-A(5G-Advanced)的感知能力,6G 水平定位精度为 5 m、提升 1 倍,垂直定位精度和速度精度提升 20%;AI 能力新增数据收集、分布式处理、分布式学习、AI 模型训练与推理等关键指标;空天地一体新定义了拓展连接与网络韧性的定性指标,重点明确了利用高空平台等新型基站支持偏远地区覆盖、灾后基础设施快速恢复等能力。

2 6G 逻辑架构:实现“一切皆服务”

面向 6G 六大场景的差异化 and 个性化需求,传统单一的通信连接能力已难以满足。数据、运营、人工智能、信息与通信技术(data, operation, AI, information and communication technology, DOAICT)深度融合,已成为业界共识的 6G 重要发展趋势^[9]。大数据、云计算、物联网和人工智能等新一代技术和应用的发展,推动 6G 向“四化”方向发展。

(1) 网络平台服务化。平台化是 6G 网络设计的必然趋势。依托 DOAICT 多要素深度融合理念,构建基于通用、开放、可共享软硬件能力的

表 1 6G 基础连接能力性能指标要求

基础连接能力指标	5G	6G	变化趋势
移动速度	500 km/h	500~1 000 km/h	小幅提升
用户体验速率	100 Mbit/s	300~500 Mbit/s	3 倍提升
频谱效率	1 倍	3 倍	核心增长
连接数密度	10 ⁶ device/km ²	保持不变	无增量
时延	1 ms	保持不变	无增量
新增关键指标	/	能效、联合容量、韧性续航	6G 新定义

表 2 6G 新增能力性能指标要求

新增能力要素	新增能力指标	指标要求
通智一体	数据收集、分布式处理、分布式学习、AI 模型训练与推理	6G 新定义
通感一体	垂直定位精度	相比 5G-A 提升 20%
	速度精度	相比 5G-A 提升 20%
	水平定位精度	5 m
空天地一体	拓展连接与网络韧性	6G 新定义



平台化网络,面向业务实现一体化能力供给、按需生成、即插即用的多样化平台能力。

(2) 性能沉浸化。网络不仅为沉浸化业务提供极致性能保障,还能够感知业务性能需求,满足多样化性能要求,提供多层次、立体式、差异化的性能保障,实现用户体验的一致性。

(3) 覆盖全域化。面向泛在互联打破地理限制、扩展覆盖维度的新需求,将地面网络与卫星网络融合组网,支持空天地海立体全域覆盖,构建空天地一体化的信息通信系统,并支持多频段融合组网。

(4) 要素融合化。全过程服务需要融合通信、感知、计算、AI、大数据、安全可信等多维度能力要素,通过网络架构的一体融合设计,实现能力要素的网络内生集成与高性能扩展。

为此,作为新一代智能化综合性数字信息基础设施,6G将由传统移动通信网络向新一代移动信息网络转型升级,提供涵盖信息采集、感知、传输、存储、处理至利用的信息流服务,实现

“一切皆服务”(everything as a service, XaaS)。

6G逻辑架构如图2所示。6G网络将成为聚合各类业务能力的“平台”和“基座”^[10]。物理基础设施层为上层业务应用、通用能力及网络架构提供泛在无线连接与算网底座。逻辑功能层通过控制面、用户面、数据面、计算面和安全面的平台化、服务化设计^[11],在物理基础设施之上,以软件形式灵活按需加载网络功能,提供通信、感知、计算、AI、数据和安全等开放能力。通过统一管理和编排,面向差异化用户需求集成相应网络功能和底层资源,形成面向不同用户的服务用例,进而为应用层提供定制化、个性化服务;同时,依托网络数字孪生技术构建低成本预验证保障环境,提供一体化移动信息服务。

3 6G技术体系:通感算智深度融合、空天地一体

3.1 6G技术体系设计

6G不仅需要实现传统通信能力的增强,还



图2 6G逻辑架构

将在5G基础上进一步实现平台化、服务化拓展,根据用户需求提供差异化、定制化的服务与能力^[12]。同时,6G更加注重能力融合与场景拓展,通过跨领域技术融合进一步推动应用创新与业务拓展,进而深刻赋能制造、交通、医疗、能源等各行业数智化转型升级。

围绕6G“四化”设计目标,本文构建了通感算智融合、空天地一体的技术体系,如图3所示。在新架构层面,在5G用户面和控制面的基础上,新增数据面、计算面和安全面;6G网络以全服务化架构为基础,引入服务化无线接入网(radio access network, RAN),支持网络功能按需编排和能力按需供给,实现网络平台化和服务化;并通过分布式自治组网、网络数字孪生等关键技术,提升网络运行自治水平。在新能力层面,6G将从通感一体、通算一体、通智一体多维度构建融合能力体系,通过通信、感知、计算、AI、安全等要素的拓维增强,提供网络新能力,实现要素融合化设计;通过空天地一体组网,打造星地异构一体化网络,实现全域立体覆盖。在新空口层面,通过超大规模天线阵列的多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术、智能超表面(re-configurable intelligent surface, RIS)技术等扩展电磁空间,为用户提供更极致的无线接入性能与泛在连接能力,实现性能沉浸化;多频段、多制式、广域与微域协同的异构融合组网技术,可在更复杂组网环境下降低网络干扰、提升频谱效率;无源物联网(passive Internet of things, passive IoT)技术可为海量物联网场景提供极低功耗、极低成本、超长续航等解决方案。在新运营层面,构建自智网络模型体系,实现网络功能与服务的灵活重构,支持多智能体协同调度与资源编排,提升网络智能化水平。



图3 6G通感算智融合、空天地一体的技术体系

3.2 6G关键技术的系统设计

为实现6G网络“四化”的总体设计目标,围绕6G通感算智融合、空天地一体的技术体系,在“新架构、新能力、新空口、新运营”等方面形成6G关键技术的系统设计。

3.2.1 新架构

(1) 平台化、服务化网络架构

6G新业务与新场景呈现需求差异化、碎片化特征,不同运营商发展需求差异显著,网络复杂度的根源在于网络需要持续适配建设、升级、维护配置等动态变化。平台化、服务化网络架构设计如图4所示。为减少、管控并稳定支撑导致网络复杂的各类变化因素,可通过极简、可靠、灵活的平台化、服务化架构设计,破解网络复杂度随需求增长而急剧攀升的难题^[13],实现6G多要素服务能力的拓展,在满足个性化和定制化需求的同时,规避传统烟囱式堆叠部署带来的成本高、能耗高和管理复杂度高的问题,推动网络降本增效。

① 基础连接——极简:设计同构的极简内核网络,优化控制面、用户面、数据面、计算面、安全面设计与组网方式,统一数据框架,降低网络复杂度;

② 超越连接——灵活:设计敏捷开放服务框架,支持网络智能自治,提升网络适应性能力;

③ 端到端连接——联合优化、系统至简:

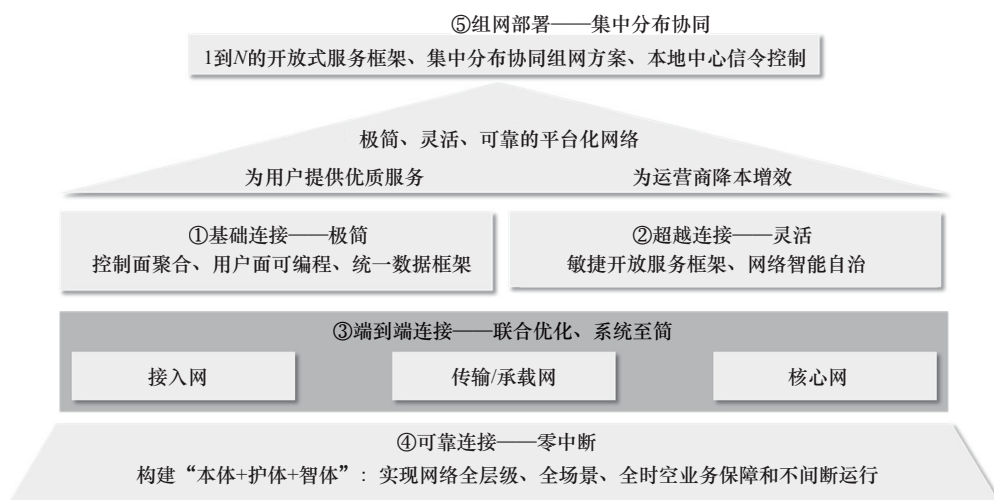


图4 平台化服务化网络架构设计

接入网、传输/承载网、核心网在各自域内实现单点简化，并开展跨域联合优化，实现系统级至简；

④ 可靠连接——零中断：在网络简化的同时保障网络的可靠性与鲁棒性，实现网络全层级、全场景、全时空业务保障和不间断运行；

⑤ 组网部署——集中分布协同：设计开放式服务框架、集中分布协同组网方案和本地中心信令控制。

(2) 智能协作无线接入网

针对6G性能量级增强、多维能力拓展和效能要求提升等需求，打破云化无线接入网（cloud radio access network, C-RAN）协作边界，深度融合通信、感知、计算与AI能力，设计智能协作无线接入网（cooperative, intelligent, service-based RAN, CIS-RAN）架构，通过AI与RAN的双向赋能实现6G性能跃升和AI服务能力拓展。

智能协作无线接入网架构如图5所示。该架构以“智能化、协作化、服务化”为核心，设计了分类采传、分层汇聚、分布智能、服务下沉、能力开放等机制。面向智能化，在RAN侧引入AI数据承载，支持AI、感知等多维数据的高效率采集和多站共享；引入集中计算单元，支持多站协作AI推理/训练、模型管理，以及网内与网

外AI应用算力的共享。面向协作化，在增强多点协作同步精度的基础上，实现基带处理单元（base band unit, BBU）间实时协作信息交互；拓展数据采集和感知功能，增设多点数据协作融合处理/存储单元，提升高效信息获取、多维信息交互与智能融合决策能力。面向服务化，定义RAN可对外提供的服务与开放框架，引入RAN集中AI单元，通过RAN直接开放、功能原子化及按需组合，实现RAN能力可开放、可定制，满足敏捷适配定制化、差异化场景需求^[14]。

(3) 可信内生安全技术

6G的新架构和新业务对网络安全提出了更高要求。针对安全能力外挂和叠加造成的性能下降、安全能力供给不灵活等问题，设计6G可信内生安全架构。该架构具备系统性、低耦合、高交互等特征，可实现信任与安全深度融合；基于信任机制构建符合预期可控的网络生态，通过安全机制提供确定性安全保障，达成信任与安全的有效互补。可信内生安全架构如图6所示，安全决策层实现多场景（如天地融合、通智融合等）安全风险全局感知与安全策略智能生成及优化，支撑安全自演进；安全编排层实现多粒度（如原子化）安全资源的弹性调度与动态配置，支撑安全自适应；安全能力层实现多形态（如服务化、

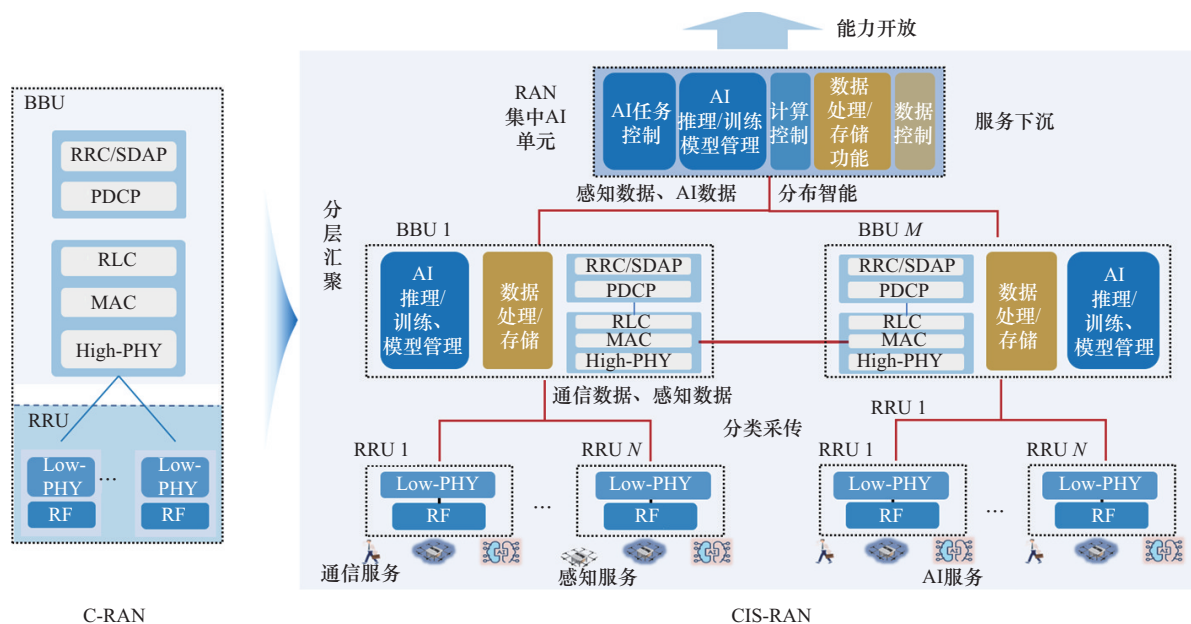


图5 智能协作无线接入网架构

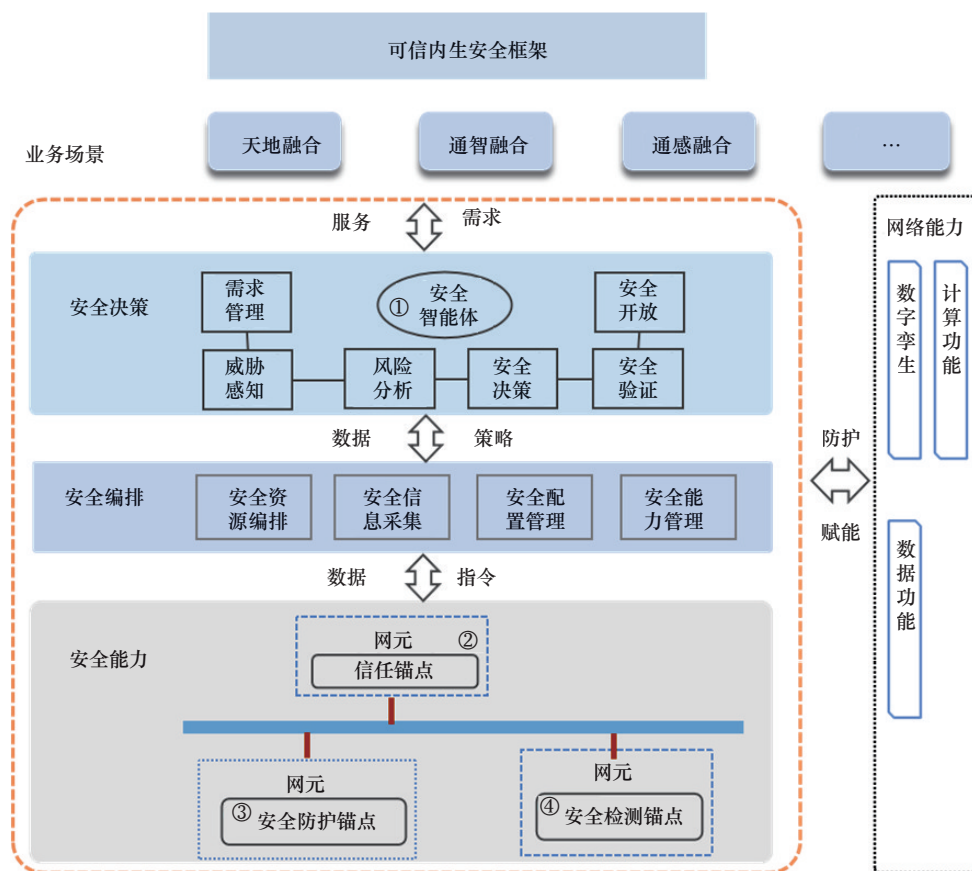


图6 可信内生安全架构

插件式)安全能力的网络内生、异构集成,支撑安全自免疫。

进一步设计基于安全智能体的决策与编排机制,依托大模型及攻防博弈构建智能可演进安全



决策闭环,覆盖“需求管理—威胁感知—风险分析—安全决策—安全验证—安全开放”全流程。同时,构建基于安全锚点与信任锚点的一体化安全能力体系。其中,信任锚点以数字身份及分布式信任基础设施为核心,作为身份与信任关系的基准;安全防护锚点采用抗攻击后量子密码算法,作为算法、协议、数据安全的基准;安全检测锚点支持网元内及网络边界的动态可配置安全检测,作为流量与行为安全验证的基点,在保障网络安全的同时维持网络整体性能平衡。

3.2.2 新能力

(1) 网络化协作通感技术

5G-A网络中部署的通感一体技术以“自发自收模式”为主,通信与感知资源独立分配,通过时分、频分等方式在基站侧扩展支持感知能力。该模式下,收发机需要保持天线分离,面临成本高、灵活性差与精度可信度不足等挑战。网络协作通感以“网”为根基,在移动通信网络中融合感知能力,实现一站发送、其他站接收(A发多收)的“协作感知模式”。

网络化协作通感技术如图7所示。针对复杂环境下多节点智能融合难、多目标智能检测难、多目标智能识别难、干扰复杂等难题,网络协作化通感技术通过多站点的智能协作,使通信网络基础设施内生支持感知能力,从而降低基站实现

的复杂度和成本。同时,通过多频段、多站点之间的协作,可实现资源的灵活调度和按需分配,提升资源利用率与感知精度,以低成本赋能网络泛在、高精度的感知能力。网络协作通感采用智能协作算法、智能识别算法、感知鲁棒算法、干扰管理等增强方案,面向手势识别、无人机跟踪等典型业务场景,可实现感知精度较“自发自收模式”提升1倍以上,并达到亚米级感知精度^[15]。

(2) 通算数智融合的网络内生AI技术

传统网络仅提供连接能力,难以满足泛在AI应用(通信、计算、数据、模型)的需求。“外挂式AI”由云端提供AI服务,网络仅作为管道,无法灵活满足多样化的AI需求。6G网络引入通算数智融合的网络内生AI机制,通过AI服务编排、AI任务管理和通算数智多维资源融合控制等编排管控技术,可支持网络内生AI服务的灵活组合与调度,实现资源的动态按需分配,保障AI服务质量(如时延要求),提升有限资源下的AI服务容量与密度,并支持智能网联的高效和安全协作。

针对当前5G通信与计算资源独立调度所导致的AI服务质量难以有效保障,甚至服务失败的问题,设计了通算数智资源融合控制功能及协同调度方案。该方案通过多目标、多终端优化和多智能体强化学习机制,实现多用户场景下的通算数智资源动态分配。通算数智融合的网络内生AI

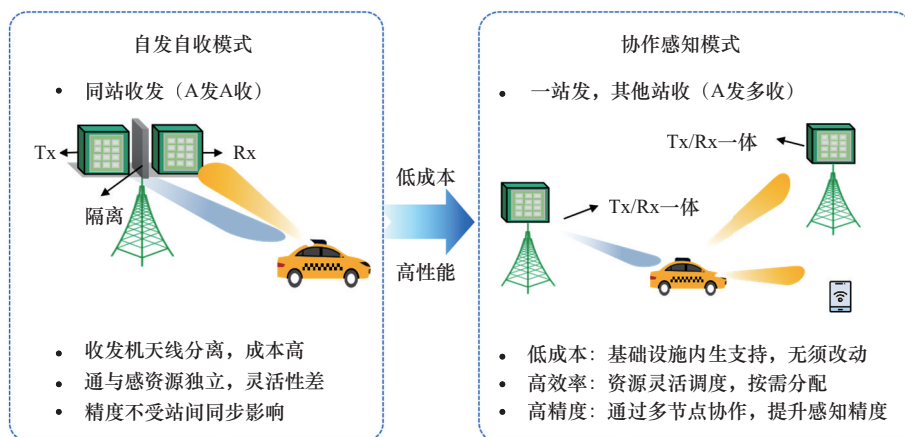


图7 网络化协作通感技术

技术如图8所示。在云边端协同的典型AI推理场景下,采用该方案可提升AI服务保障成功率30%,高效满足端到端AI时延需求^[16];引入端到端多用户AI任务调度机制,可综合利用核心网和无线网资源,提升系统的AI服务容量与密度。

(3) 星地融合组网的天地一体技术

5G 非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 系统是在5G基础上的适应性增强,系统相对独立,星地之间呈松耦合关系。6G天地一体技术需要向“紧耦合”演进,通过多轨卫星网络与地面移动通信网络的灵活组网,支持星地动态智联与资源高效共享,实现“以地强天、天地一体”。

星地融合组网的天地一体技术如图9所示。针对卫星网络拓扑复杂多变、频率资源受限、建设周期长、成本高等问题,通过星地异构一体化网络设计,结合地面网络部署及业务情况,高效交互星地信息,灵活动态地调整星地资源,可实现覆盖协同与业务体验的最优平衡,降低星座建设成本,提供由地面主导的星地资源高效协同与无缝立体服务。通过高、中、低轨及地面协同的动态簇组网结构设计,结合分布式自治网络、频分双工 (frequency division duplex, FDD) 与时分双工 (time division duplex, TDD) 融合频率共享、基于跳波束的空口设计,以及高动态空间传送网技术,可保障多轨卫星网络与星地网络的无

缝覆盖及资源高效协同,降低天地一体组网成本。

3.2.3 新空口

(1) 网络化协作MIMO技术

传统单站MIMO能力受限,受天线面板尺寸、功耗、成本限制,天线阵子数量、基站发射功率无法无限增长。在集中式大规模天线系统中,受限于网络干扰,边缘用户性能远低于小区中心用户,难以保障用户的无差异体验。6G网络协作MIMO技术通过基站间的智能协作接入与传输,构建以用户为中心、多站分布式协同的智能协作大规模MIMO系统。网络化协作MIMO技术如图10所示。

针对现有RAN不支持跨BBU实时交互、难以实现“无界”协作的问题,通过引入BBU间实时协作信息交互,增设多点数据协作融合处理单元,支撑网络“协作化”核心要素,消除“小区边界”。针对协作簇构建流程冗长、用户接入协作簇存在切换“掉坑”问题,采用无蜂窝组网技术,可实现协作簇的动态接入与切换,以协同波束的平滑转换替代传统的小区硬切换,实现用户“始终在线”的协作簇接入。针对大规模MIMO天线系统校准精度欠佳、难以支撑相干联合传输 (coherent joint transmission, CJT)、协作增益受限的问题,设计了基于终端反馈的站间同步校准方案。该方案可根据终端反馈信息实现跨分布单元 (distributed unit, DU) 的高实时性、高精度

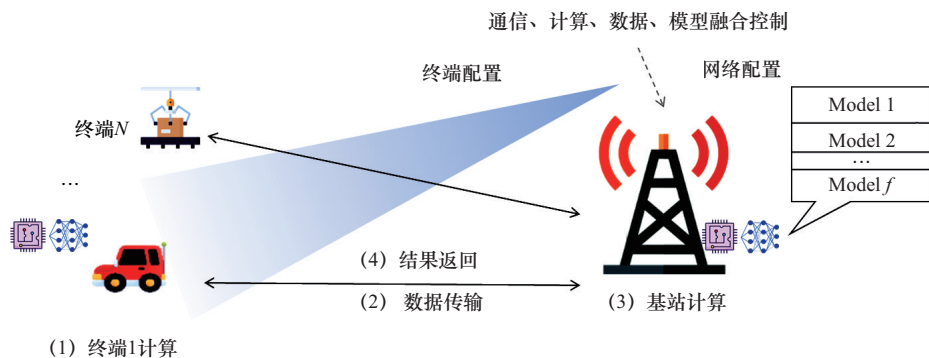


图8 通算数智融合的网络内生AI技术

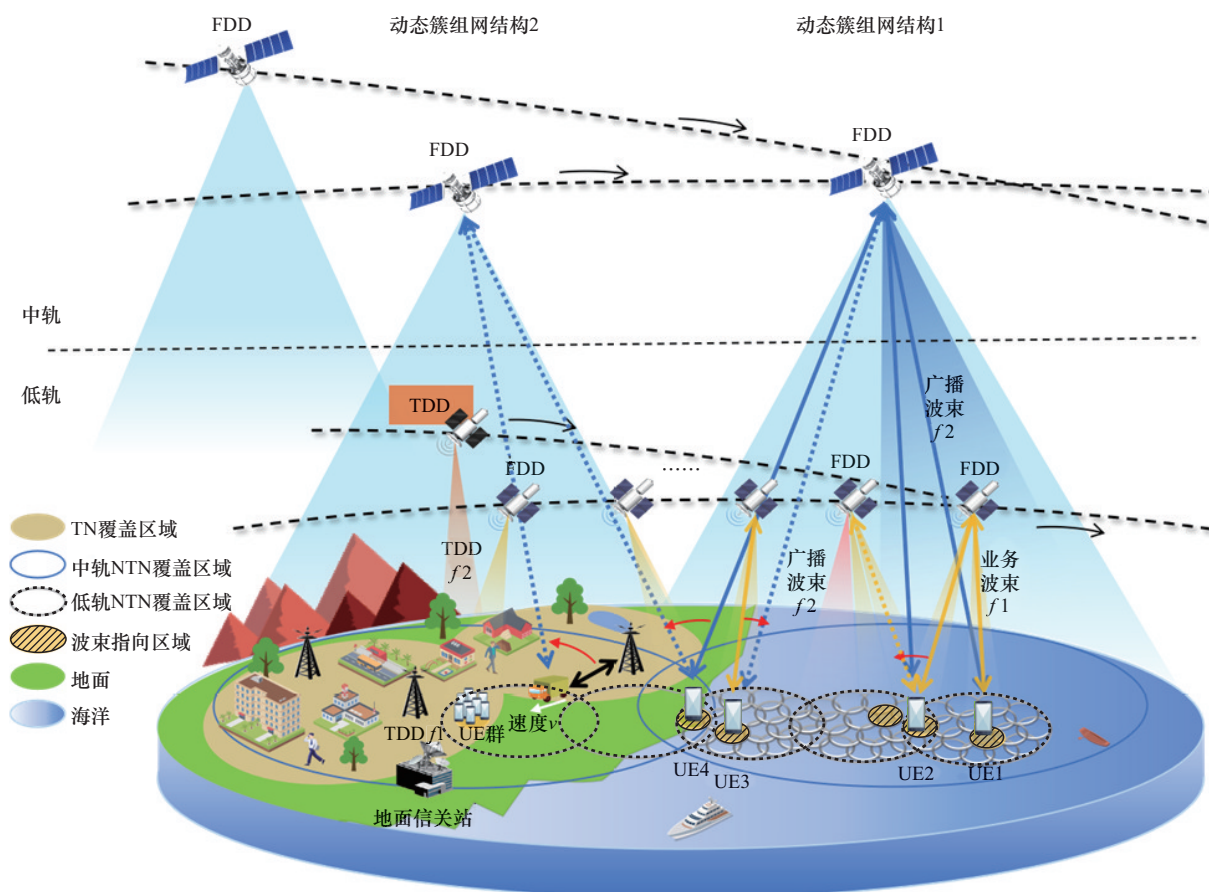


图9 星地融合组网的天地一体技术

站间同步校准,保障多站信号相干叠加,实现灵活动态的协作传输。针对以用户为中心的协作引发的簇交叠、拓扑复杂化、预编码算法复杂度高的问题,设计了低复杂度可解释智能协作传输算法,将复杂的全局问题拆解为多个可并行处理的局部子问题,以通信理论模型为先验知识指导AI训练,实现算法可解释性、复杂度与性能之间的平衡。

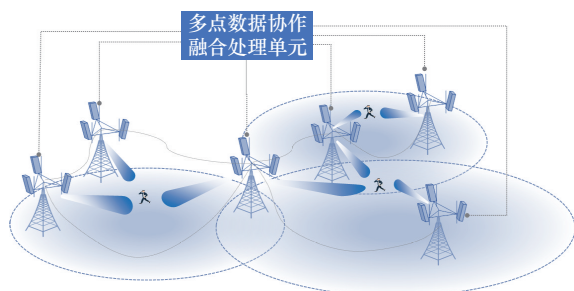


图10 网络化协作MIMO技术

(2) 智能空口传输技术

针对空口AI性能提升难、基带算法复杂度高,以及数据集构建开销大、AI算法复杂度高、泛化性差等问题,基于“能力、质量和代价”三维均衡的设计准则,通过最大化多场景通信能力与综合代价的比值,优化信道获取、数据采集、收发多模块联合设计及多小区联合预编码算法。

多模块融合的智能空口传输系统如图11所示。在该系统中,可将探测参考信号(sounding reference signal, SRS)信道预测、信道状态信息(channel state information, CSI)信道预测、解调参考信号(demodulation reference signal, DMRS)信道估计、单小区调度与MIMO预编码、非线性补偿等传统单AI模块功能进行融合设计和联合优化。针对多小区系统,还可以通过多小区协作、

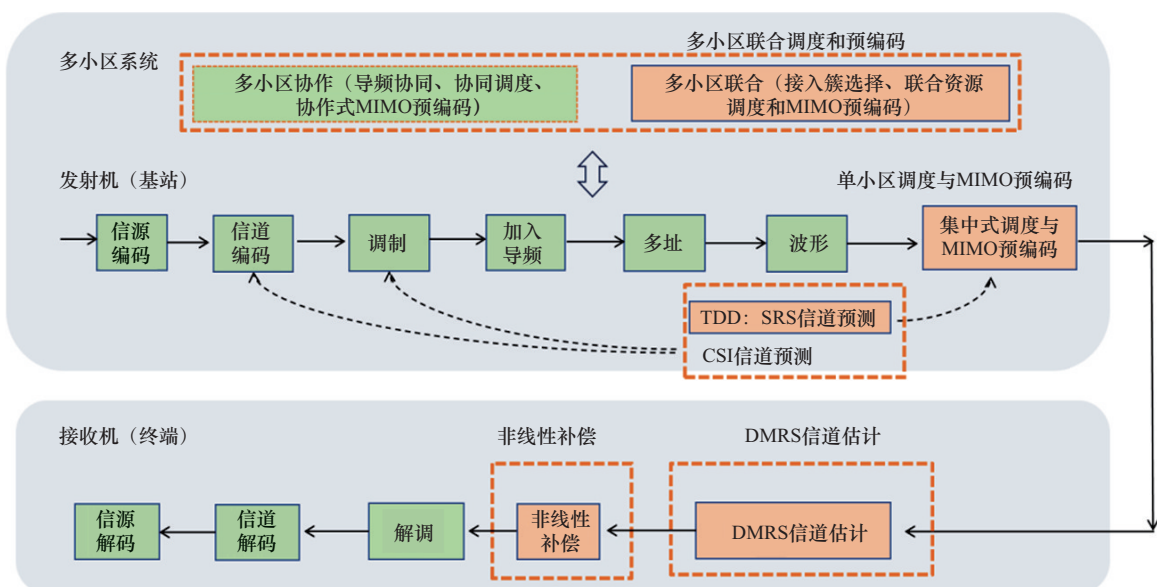


图 11 多模块融合的智能空口传输系统

多小区联合设计，实现多小区联合调度和预编码，进一步降低空口传输开销、提升传输性能。仿真结果表明，采用低开销数据集构建方法，可降低 90% 的采集开销和 95% 的信道反馈开销；采用基于 AI 的 DMRS 疏密导频方案，在相同信道估计效果下可降低导频开销 60% 以上；采用大规模 MIMO 信道获取多模态 AI 模型方案，可降低模型复杂度 80%、推理复杂度 50%^[17]。

(3) 蜂窝无源物联网技术

无源物联网技术具有极低成本、极低功耗、灵活组网、自动识别的特点，但目前面临覆盖距离短、高效接入难、融合水平低等挑战。蜂窝无源物联网技术如图 12 所示。基于蜂窝通信网与无源物联网融合的理念，设计蜂窝无源物联网统一管理平台，可实现对网络设备、分布式节点及不同类型标签（含纯无源标签、半无源标签和主动式标签等）的协同管理，推动从单点识别向网络化部署的演进，拓展自动盘点、低成本定位等服务，并结合大数据和 AI 技术进一步拓展数据运营能力，有望带来万亿级连接空间。

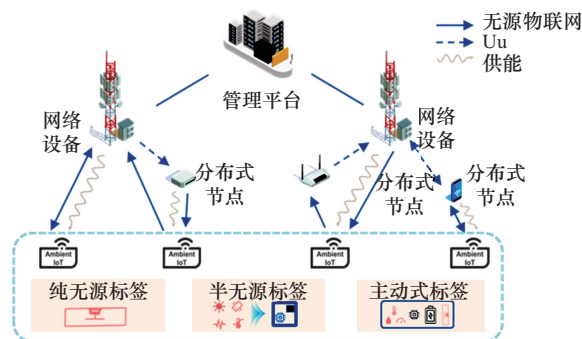


图 12 蜂窝无源物联网技术

针对标签回波干扰严重、覆盖接入距离短等难题，通过链路余量增强、多节点协作等技术，通信距离可提升至 30~50 m，实现反向散射覆盖增强；采用高性能射频端口、能量采集及管理机制，标签动态范围可提升至 38 dB，采能灵敏度突破 -27 dBm，实现极低功耗能量采集。针对标签碰撞率高等固有挑战，采用防碰撞算法、多站组网盘点机制等，标签传输效率可提升至 1 200 个/s，实现海量标签的高效接入^[18]。

3.2.4 新运营

AI 智能体通信网络（AI-agent communication network, ACN）是智能体与 6G 深度融合及双向赋能的产物。基于 6G 内生的通感算智安一体



化能力,可为智能体提供连接、赋能、管理等多维信息服务;基于智能体具备的感知、决策、执行能力,可实现6G网络的闭环自智优化^[19-20]。智能体通信面临连接、计算、数据、安全等多维异构要素的复杂约束,通过端到端网络架构、功能流程及接口协议设计,可满足智能体多维异构需求。

自智网络与智能体通信技术如图13所示。异构智能体层包含各类异构智能体,如人形机器人、机器狗、无人机、车载智能体等,是网络的服务对象和执行主体,通过上层网络实现协同与交互。连接与路由层负责异构智能体的网络接入与数据传输,通过网络算力、IP网络、边缘算力、中心算力的协同,构建分布式、高可靠的通信基础设施,为上层服务提供网络连接和数据路由能力。服务化功能层通过服务化接口(service-based interface, SBI)进行网络交互:计算面和数据面分别提供计算能力及数据管理方面的接入控制和性能优化;控制面负责任务协作、跨域连接和身份管理,保障智能体协作的有序性和安全性;用户面实现模态转换和流量调度,适配多模态交互需求并优化资源分配。智能体通信服务域是应用与管理平面,通过智能体基础接口(agent base interface, ABI)与下层服务交互,主要包括以下部分。

(1) 智能体管理平台:提供注册发现、权限管控、行为监测等能力,实现对智能体的全生命周期管理。

(2) 模型及知识库:包含网络大模型和共享知识库,为智能体提供知识支撑和智能决策能力。

(3) 模型上下文协议(model context protocol, MCP)服务:通过MCP服务,实现智能体与外部工具、资源和提示词(Prompts)的标准化交互。

(4) 协议转换:通过MCP、智能体间(agent-to-agent, A2A)通信协议、智能体协作协议(agent collaboration protocol, ACP),实现不同智能体之

间的通信与协作。MCP解决“智能体如何调用外部工具”的问题,专注于智能体与工具/资源的垂直整合;A2A解决“智能体如何协同”的问题,专注于智能体间的水平协作;ACP提供智能体协作的完整协议套件,支持复杂任务的协同执行。

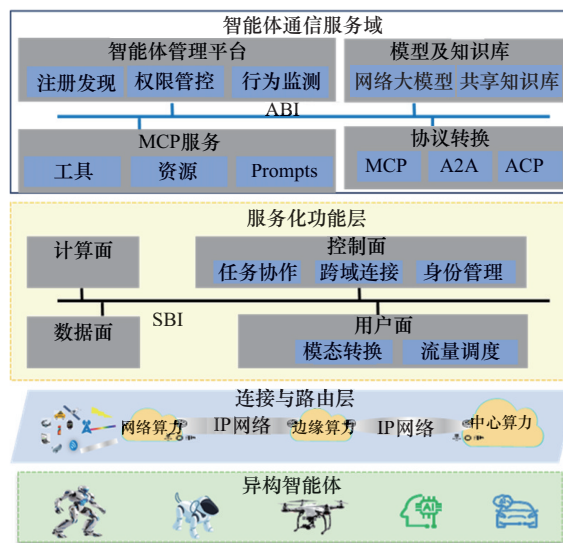


图13 自智网络与智能体通信技术

4 结束语

随着第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)正式启动6G标准化工作^[21],6G研发已从技术预研进入标准化、产业化的关键阶段。下一步,需从两方面协同推进6G技术研发。一是“进标准”。围绕6G通感算智融合、空天地一体的技术体系,系统攻关6G关键核心技术,推动相关技术方案纳入国际标准规范,形成广泛的技术和标准共识。二是“进产业”。基于6G通感算智融合、空天地一体的技术体系,形成6G端到端的系统设计,为6G试验装置的研制及预商用产品样机的研发提供技术指导,带动全产业链上下游开展协同攻关和试验验证,推动形成全球统一的6G国际标准和产业生态。

参考文献:

- [1] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G 愿景与需求: 数字孪生、智能泛在[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 3-9.
Liu G Y, Jin J, Wang Q X, et al. Vision and requirements of 6G: digital twin and ubiquitous intelligence[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 3-9.
- [2] Pérez-Valero J, Virdis A, Sánchez A G, et al. AI-driven orchestration for 6G networking: the hexa-X vision[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1335-1340.
- [3] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023.
- [4] 刘超, 陆璐, 王硕, 等. 面向空地一体多接入的融合 6G 网络架构展望[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 116-120.
Liu C, Lu L, Wang S, et al. Prospects for a multi-access air-space-terrestrial integrated 6G network architecture[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 116-120.
- [5] 息荣艳, 吕思颖, 张小舟, 等. 网络化协作通感一体挑战与关键技术[J]. 移动通信, 2025, 49(12): 2-11.
Xi R Y, Lyu S Y, Zhang X Z, et al. Challenges and key technologies for networked cooperative integrated sensing and communication[J]. Mobile Communications, 2025, 49(12): 2-11.
- [6] 尹浩, 黄宇红, 韩林丛, 等. 6G 通信 - 感知 - 计算融合网络的思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(9): 1838-1842.
Yin H, Huang Y H, Han L C, et al. Thoughts on 6G integrated communication, sensing and computing networks[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2023, 53(9): 1838-1842.
- [7] Huang Y H, Tong Z, Li N, et al. The roadmap to 6G: intelligent and lean networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2025, 63(8): 40-46.
- [8] ITU-R. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2030 radio interface(s)[R]. 2026.
- [9] 刘光毅, 张慧敏, 佟舟, 等. 6G 移动信息网络架构: 从通信到一切皆服务的变迁[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1236-1266.
Liu G Y, Zhang H M, Tong Z, et al. 6G mobile information network architecture: migrate from communication to XaaS[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1236-1266.
- [10] 中国移动. 6G 通感算智融合原生基座技术白皮书[R]. 2024.
China Mobile. The integration of communication, computing, sensing, and AI native foundation technology for 6G white paper[R]. 2024.
- [11] Li N, Liu G Y, Zhang H M, et al. Micro-service-based radio access network[J]. China Communications, 2022, 19(3): 1-15.
- [12] 黄宇红, 王启星, 李娜. 6G 智简无线网络[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 3-9.
Huang Y H, Wang Q X, Li N. Intelligent and lean 6G network[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(4): 3-9.
- [13] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构展望[R]. 2023.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. Prospects for 6G network architecture[R]. 2023.
- [14] 中国移动通信研究院, 中关村泛联移动通信技术创新研究院. RAN 能力开放白皮书 1.0[R]. 2025.
China Mobile Research Institute, ZGC Institute of Ubiquitous-X Innovation and Applications. RAN capability exposure white paper[R]. 2025.
- [15] Han Z X, Ding H Y, Zhang X Z, et al. Multistatic integrated sensing and communication system in cellular networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 123-128.
- [16] Chen T J, Deng J, Li Y R, et al. Multi-objective AI service quality optimization for generative AI inference in native AI wireless networks[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 102nd Vehicular Technology Conference (VTC2025-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-5.
- [17] Shi Z Y, Han S F, Li G. Model selection methods based on comprehensive evaluation criteria of AI for air interface[C]//Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2025: 2033-2038.
- [18] Wang Y M, Ma S, Li Y, et al. Constrained multi-objective particle swarm optimization for bistatic RFID network planning with distributed antennas[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2025, 94: 101882.
- [19] Duan X D, Huang Z L, Liang S Y, et al. AI-agent communication network for 6G: vision, architecture, and key technologies[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2025, 26(11): 2065-2080.
- [20] Jiang C X, Ge N, Kuang L L. AI-enabled next-generation communication networks: intelligent agent and AI router[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 129-133.
- [21] NTT DOCOMO, CMCC, AT&T, et al. RP-252912 Revised SID: study on 6G radio[R].

[作者简介]

刘建军 (1979-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院主任研究员、高级工程师, 主要研究方向为 6G 总体设计、6G 无线通信关键技术、通感算智融合技术等。





佟舟（1996-），女，中国移动通信有限公司研究院高级研究员，主要研究方向为6G总体设计、6G高层协议栈、6G智简网络、服务化RAN等。



李娜（1988-），女，中国移动通信有限公司研究院主任研究员、高级工程师，主要研究方向为5G/6G接入网架构与协议设计等。



施南翔（1987-），男，中国移动通信有限公司研究院主任研究员、高级工程师，主要研究方向为6G网络架构、核心网技术。



刘光毅（1974-），男，博士，中国移动通信有限公司集团级首席专家，中关村泛联移动通信技术创新应用研究院首席科学家，正高级工程师，国家重点研发计划项目“6G网络架构及关键技术研究与验证”负责人，国家新一代移动信息网络重大专项“面向6G的多源融合智能协同通感一体关键技术研究与验证”项目负责人。主要研究方向为6G智简网络、协作通感、协作化超大规模MIMO、网络数字孪生等。