

6G 绿色内生网络技术研究

Research on Green Endogenous Network Technology for 6G

吕婷,李福昌,张忠皓,曹亘(中国联通研究院,北京 100048)

Lü Ting, Li Fuchang, Zhang Zhonghao, Cao Gen (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要:

作为新一代信息服务网络,6G网络在性能跃升的同时面临能耗上升的严峻挑战。为了促进6G可持续发展,分析了6G绿色内生网络的驱动力与挑战,从绿色组网架构、通感算智协同调度、端网协同的绿色空口、基于AI的智能节能几个方面介绍了6G绿色内生网络技术,涉及6G网络设计、部署、运行、编排管理等各环节,系统性构建6G节能技术体系。

关键词:

6G;绿色内生;绿色组网;绿色空口;智能节能
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.02.003
文章编号:1007-3043(2026)02-0011-06
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

As a new generation of information service infrastructure, 6G network is confronted with the severe challenge of rising energy consumption while experiencing a significant leap in performance. To facilitate the sustainable development of 6G, the driving forces and challenges of 6G green endogenous network are analyzed, the technologies of 6G green endogenous network are introduced from the aspects of green networking, collaborative scheduling of communication sensing computing and intelligence, green air interface based on terminal-network collaboration, and AI-based intelligent energy saving. These technologies are relevant to all stages such as the design, deployment, operation and orchestration management of the 6G network, systematically constructing the 6G energy-saving technology system.

Keywords:

6G; Green endogenous; Green networking; Green air interface; Intelligent energy saving

引用格式:吕婷,李福昌,张忠皓,等. 6G绿色内生网络技术研究[J]. 邮电设计技术,2026(2):11-16.

1 概述

在移动通信领域,能源消耗一直是移动通信运营商运营成本的重要组成部分。根据GSMA的报告,移动网络的能源成本约占运营商总成本的23%,其中基站作为最大的能源消耗设备,能耗约占典型运营商总能耗的73%。与此同时,随着数字化、智能化时代的到来,对算力的需求呈爆发式增长,数据中心耗电量在社会总耗电量中的占比不断提升,信息技术领域的

能耗危机日益凸显。

未来,6G网络将实现通信、计算、感知、智能一体化融合,成为新一代信息通信基础设施,满足多模态、多场景服务需求,并具备网络自智能能力^[1-2]。相比现有通信与算力网络,6G在性能量级提升的同时将面临更加严峻的能耗挑战,这就要求6G网络能够实现能效的倍增。为此,有必要系统性研究6G节能技术,构建6G网络的绿色内生能力,促进6G可持续发展。

2 构建6G绿色内生网络的驱动力与挑战

2.1 驱动力

收稿日期:2025-12-29

未来 6G 业务将呈现沉浸化、智慧化、全域化等发展趋势,带来沉浸式云 XR、全息通信、感官互联、智能交互、数字孪生等许多新产业、新模式。这些新业务将对 6G 网络提出更高的要求,比如支持超高可靠低时延通信、超密泛在连接、超高移动性等,以满足极致体验和万物智联的需求^[3-4]。为了满足新业务的需求,6G 网络需部署更多通信、计算、存储、网络等资源,随之带来更大的能源开销,对绿色节能技术的需求更为紧迫。

与此同时,服务化、云原生、AI 等新技术的发展有助于实现弹性灵活的组网与资源调度,分布式 MIMO、高频通信、智能超表面等无线新技术将进一步提高空口能力,实现信息传输方式的革命性突破^[5-6]。各种新技术的发展将赋能 6G 绿色内生网络构建,成为 6G 系统能效提升的潜在底层技术。

2.2 挑战

现有的无线网络节能技术主要根据业务潮汐特征,对网络设备的软硬件资源进行合理调度,关闭部分资源以达到节能效果^[7-8]。未来,随着 6G 业务场景的多样化发展,网络会出现多种业务并发,不同业务呈现差异化的时空特征,对网络资源与传输性能的需求也不同。如何在保障差异化业务需求的前提下精准调度多维资源,实现高能效的空口传输,成为未来 6G 节能技术要解决的关键问题。

此外,随着人工智能、区块链、元宇宙等技术迅猛发展并向各行各业渗透,特别是随着模型复杂度、精度与参数量级的不断提升,对算力与能耗的需求越来

越高。目前,部分高性能 GPU 芯片的功耗可达 700 W。大量高算力芯片的应用,将带来能耗的爆发式增加。面向 6G 时代智能内生的应用场景,需要深入研究通、感、算、智一体化网络的绿色节能技术,在满足行业资源需求的同时,解决高能耗的问题。

3 6G 绿色内生网络使能技术

3.1 6G 绿色组网技术

3.1.1 6G 绿色内生网络的逻辑架构

网络架构是影响网络效能的重要因素,为了构建高能效的 6G 网络,图 1 给出了一种绿色内生的 6G 网络逻辑架构,分为资源层、功能层、应用层以及贯穿各层的管理编排功能与节能编排功能。

资源层提供频谱、终端、站点、传输、计算以及存储等多维基础资源,面向通、感、算、智等多类型服务提供底层资源支持。为了满足 6G 新兴业务的多样性资源需求,资源层不仅包括终端、接入网设备等通信基础设施,还包括 CPU、GPU、NPU、FPGA、存储、网络等泛在异构算力资源。此外,频谱、数据、能源也是 6G 网络的重要基础资源,接受网络上层的协同编排与调度。在物理形态方面,多维异构的基础资源可以在空间上分布于云、边、端不同的节点位置。

功能层支持连接、计算、AI、感知、数据、安全以及节能等一体化功能。连接功能用于提供通信服务,包括控制面与用户面功能,前者用于实现泛在接入控制、移动性管理、策略控制、服务部署等功能,后者支持业务数据的转发与处理。计算功能基于算力感知、



图 1 6G 绿色内生网络的逻辑架构

编排管理,将不同的计算业务通过最优路径分配到最优的计算节点,兼顾业务感知和全局资源优化,为数字化、智能化业务提供性能保障。AI功能通过内生的算力、算法、数据等资源,支持模型生成、选择、传输以及训练推理等能力,可用于6G网络自身的智能化运行,也可作为一种服务向第三方应用开放。感知功能主要通过复用通信资源,实现感知信号收发与感知数据处理,提高通信基础设施利用率。数据功能包括数据编排控制、处理转发、存储等功能,提供数据采集、预处理、存储、共享等服务。节能功能主要支持对通信、算力、AI资源以及能源的一体化管理,支持面向通信与算力设施的各类软硬件节能技术以及智能节能技术。

应用层通过能力开放、应用使能框架等方式为各类业务应用提供网络服务,基于服务化接口,感知业务对连接、计算、AI等功能的需求,并映射为性能指标需求,用于对资源的编排与调控。

管理编排功能可基于应用层的业务需求,对网络功能、基础资源进行统一调度与部署,规划匹配的业务流程、网络路由和配置参数,完成网络功能的自动化部署,支持端到端的业务保障。

节能编排功能贯穿应用层、功能层、资源层,通过联合调用多域节能技术,实现6G网络绿色内生的目标。首先,自动识别应用层的节能场景并感知差异化

节能需求,将节能需求映射为不同的网络能效指标与业务性能指标要求,并按需调用功能层的不同节能功能以及对应的基础资源,生成节能策略并编排节能任务。根据功能层的节能策略,资源层的终端、接入网设备、算网设备分别执行相应的节能任务。例如,终端设备可进入DRX或休眠状态、激活RRM测量放松、减少使用的天线数等;接入网设备在节能时段进入关断或休眠状态;算网设备根据节能需求,通过电压动态调控、算力资源动态回收等,降低计算能耗。

此外,节能编排功能在调用节能功能的同时,还可联合调用AI功能,实现智能化节能控制。例如,基于意图感知能力收集、转换、推演用户意图,并通过学习网络的历史数据信息,利用大模型、生成式AI、强化学习等技术调用节能功能与基础资源,自动生成智能节能策略,提高网络能效。

3.1.2 6G绿色内生网络的组网架构

如图2所示,为了满足泛在连接以及极致连接性能的需求,6G网络将基于分布式架构组网。中心云提供广域连接、集中式AI、云计算、感知等功能。边缘云可用于满足多样化的覆盖场景,例如,地面公网覆盖、地面专网覆盖、低空覆盖、卫星覆盖等。针对不同场景需求,采用定制化、精简化的基础资源与网络功能,实现按需弹性部署。同时,基于服务化架构支持边缘云网络自治、即插即用。边缘云之间、边缘云与中心

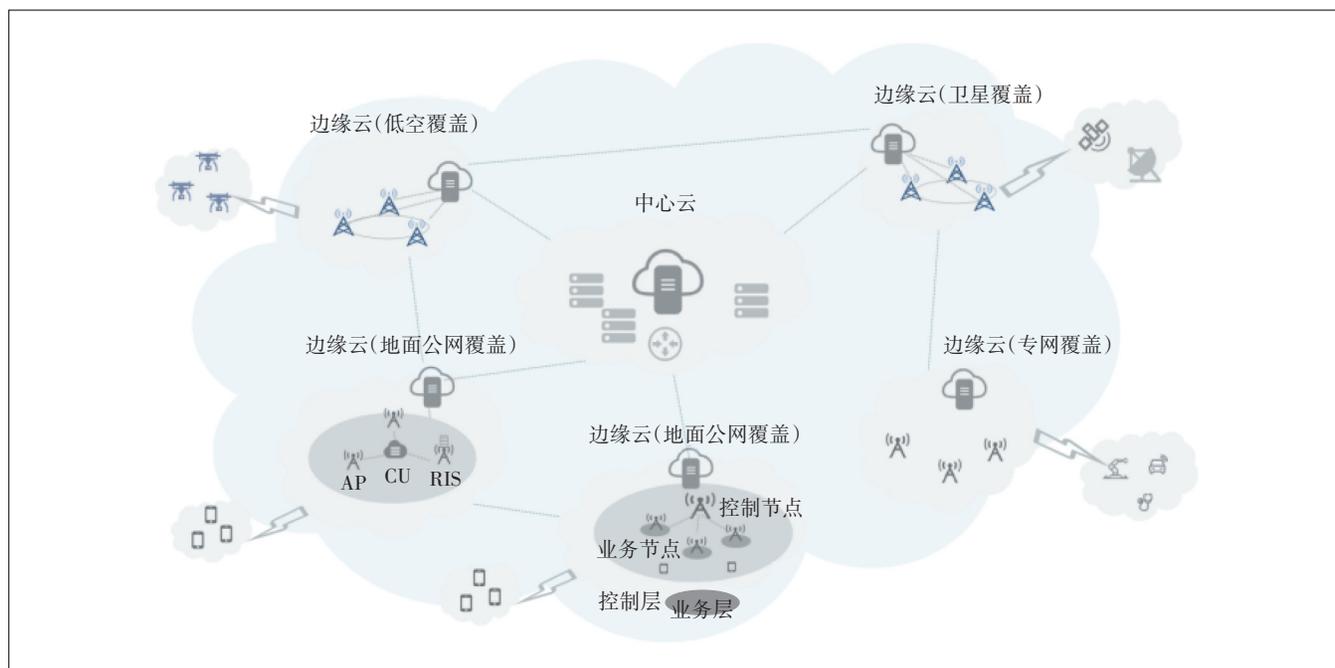


图2 6G绿色内生网络的组网架构

云之间互联互通、资源共享、深度融合,采用统一的协议栈,支持海量用户无感知、极简的泛在接入。充分利用各节点的 AI、通信、计算和感知能力,通过分布式学习、群智式协同,实现端到端智能编排调度、跨域智能管控,保障以用户为中心的业务感知和最优的网络能效。

在无线接入端,可采用超蜂窝、无蜂窝等低功耗组网架构^[9]。在超蜂窝架构下,连接功能的控制面与用户面解耦,可分别独立部署于控制节点和数据节点;前者采用大区覆盖模式以提供用户接入以及控制;后者按需局部部署,为用户提供数据传输服务。同一个控制节点覆盖范围内可以部署多个数据节点,且数据节点可根据业务负荷变化动态休眠,提升网络节能效果。无蜂窝架构以用户为中心,部署多个分布式接入点(AP)以及一个与所有接入点相连接的中央处理单元(CU),通过中央处理单元的集中信号处理,广泛分布的接入点可以实现高水平的协作^[10-11]。每个用户接入一组特定的分布式接入点,利用空间宏分集和低路径损耗提升系统频谱效率和能量效率。分布式接入点还可以采用智能超表面(RIS)等低功耗中继设备,有效降低系统总能耗。

3.2 通感算智协同调度技术

6G 网络将引入新的资源维度,除传统的通信资源外,还包括多样性的算力资源、模型等,基于多维资源聚合,协同提供通感算智服务^[12]。同时,随着集中式 AI 向分布式 AI 发展,以及智能手机、智能网联汽车等智能终端的涌现,6G 网络中将分布着海量的数据和算力,它们支持大规模分布式训练、实时边缘推理以及本地数据处理。基于多维资源协同调度,可以提升资源与能源利用率,达到节能降碳的目的。

如图 3 所示,通感算智协同调度技术根据网络状态感知信息与业务需求信息,协同调度通信、感知、AI、计算、能源等多维资源,对跨域、跨平台、云边端资源进行动态调整,形成资源调度策略,实现业务需求、基础资源与能耗之间的最佳适配^[13]。对于分布式计算任务,根据计算节点的负荷、信道状态和计算能力等,在分布式任务卸载时选择满足算力及能量需求的高能效节点。当多个节点均可提供当前业务所需资源时,优先选择能效较高的节点提供服务;当某个复杂业务需要大规模算力资源时,可以选择多个低负荷节点协作服务,将算力汇聚于少数邻近节点,以降低节点间通信带来的能耗。



图3 通感算智协同调度架构

网络状态感知信息作为协同调度的决策依据,包括通信资源状态、算力资源状态、设备运行状态等,由资源层节点采集,或者调用感知功能获取实时感知信息。通信资源状态信息包括节点的负载、传输带宽、传输时延等参数;算力资源状态包括节点的负载状态、计算能力、接口通信能力、存储能力等;设备运行状态反映资源节点的位置、容量、能耗、故障等信息。此外,基于服务化接口获取的应用层业务需求信息,也可作为多维资源协同调度的输入要素,用于保障差异化的业务性能要求。

3.3 端网协同的绿色空口技术

3.3.1 统一空口接入

面向空天地海一体化覆盖、2B覆盖等多样化场景,6G网络可采用统一核心网、统一的终端接入控制,构建极简网络,提高组网效率。不同覆盖场景下的本地无线接入网可以接入同一核心网,通过统一的接入控制流程与移动性管理机制,用户可在不同的本地网之间无感知切换,保障业务连续性与感知一致性,实现6G全场景泛在连接(见图4)。

在多接入场景下,基于空口感知能力,识别出不同类型的终端能力以及网络环境,为不同终端选择合适的空口技术及无线接入设备,基于一张网、一套空口协议为不同类型终端提供服务,实现网络资源的动态共享和按需调度,降低网络的部署成本与能耗。

3.3.2 极简信令面与用户面

在传统无线网络中,公共信号与公共信道是系统信令开销的主要组成部分。6G将引入更多频段、更大

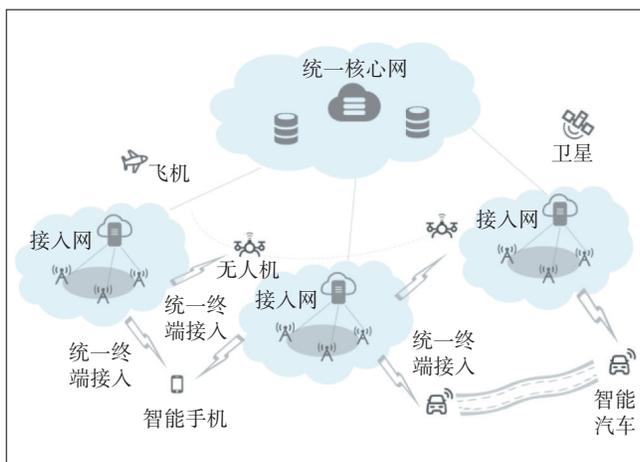


图4 统一空口接入技术

带宽,支持更多载波数,将导致更高的信令开销,影响网络能效。极简信令面主要通过降低公共信号开销的方式提升系统能效。在小区低负荷时,通过增加公共信号的发送周期、按需发送公共信号或者将多载波的公共信号汇聚在一个载波上传输,尽可能减少公共信令开销,增加小区进入休眠状态的几率。对于大规模MIMO,还可按需配置CSI测量粒度,降低测量开销。另外,在传统蜂窝系统中,终端接入网络需要复杂的消息交互过程,这同样会带来信令开销。6G支持连接数较5G将提升10~1 000倍,传统的接入方式将导致信令风暴和功耗增加。为此,面向超大规模连接场景,6G网络可采用稀疏导频、无导频接入等技术,使终端无需复杂信令交互即可发起传输,实现低信令开销、低功耗接入。

为了实现极简用户面,可将用户面解耦为不同粒度的功能模块,基于微服务技术,按需组合编排,提供数据转发能力以及差异化传输性能保障。在不影响TCP传输性能的前提下,裁剪无线链路控制(RLC)协议栈的自动请求重传或分组数据汇聚协议(PDCP)的按序递交功能,通过协议栈功能简化,降低用户面时延与功率开销。

3.3.3 高能效空口传输

基于终端与网络之间的协同,使终端与基站能够在更小的时间粒度上进入低功耗或休眠状态,实现高能效的空口传输。当终端无数据传输时,基站进入休眠状态,关闭部分硬件资源,并指示终端停止接收下行控制信令或发送上行传输请求;当终端有数据传输需求时,发送上行唤醒信号以触发基站发送按需的公共信号,并自适应调整公共信号的发送功率与周期,

尽可能降低功率开销。

在传统的终端与基站通信模式的基础上,还可考虑将终端间直接通信作为辅助通信方式。终端直连模式不仅可节省基站的资源开销与通信能耗,还可降低终端的接入能耗,是泛在连接场景下高能效的接入方式。

3.4 基于AI的智能节能技术

3.4.1 AI辅助的无线资源管理

基站功耗与发射功率直接相关,为了提高设备能效,需要对基站的功率分配机制进行优化。在6G部署超大规模天线的情况下,基于AI辅助的功率分配机制将有助于降低基站整体发射功率。例如,利用神经网络技术,根据信道状态、业务需求变化动态确定每个天线的发射功率或开关状态,可实现功率按需配置,在满足覆盖需求的前提下节省设备功耗^[14]。

不合理的移动性管理将导致不必要的功耗,通过AI辅助的移动性管理,可实现覆盖与容量的自适应调整,通过减少不必要的覆盖范围以及基于需求动态分配资源,可最小化网络能耗。例如,利用AI从少量移动性数据中学习先验知识,预测潜在的移动轨迹,使基站可预先基于覆盖需求调整切换目标基站的功率参数,并及时降低源基站的功率,在提升终端切换性能的同时降低网络能耗。

在分层网络中,通过业务分流可将终端或业务负载从容量层小区迁移到覆盖层小区,减少过载小区过多的能量消耗或允许轻载小区进入休眠模式,从而优化整体功耗。结合AI算法,可以提高业务分流效能,生成使区域总能耗最小的最佳分流策略,并且在策略执行后可进一步获取区域能耗值,迭代优化AI模型。

3.4.2 基于数字孪生的智能节能技术

数字孪生技术通过创建物理实体的虚拟镜像,借助数据传输实现物理实体与虚拟模型间的数据交互,通过仿真、实测、数据分析、模拟运行等多种方式实现对物理世界全生命周期的虚拟验证、决策支持和优化控制。将数字孪生技术引入6G网络,借助AI、大数据技术,对网络实体进行分析、评估、仿真和控制,可辅助实现6G智能化节能^[15]。基于数字孪生的智能节能技术包括如下步骤。

a) 构建与物理网元、网络运行过程相对应的数字模型,实时采集网络真实数据。

b) 利用深度学习、机器学习等AI算法预测网络负荷、能耗、业务感知性能的未来变化趋势,并基于知

识图谱等算法生成最优的节能调度策略。

c) 将仿真得到的节能策略执行后的网络与业务感知性能评估结果作为反馈参数,对节能策略进一步调优,生成节能任务。

d) 通过指令通道将节能任务发送至物理网络,实现对6G网络的实时节能控制。

e) 物理网络执行节能任务后的真实数据进一步反馈至孪生网络进行策略效果评估,并再次触发策略优化,实现虚实闭环。

3.4.3 分布式智能节能技术

在万物智联的愿景下,AI能力不仅内生于网络节点,还将分布于各类终端设备中,终端设备将具备通信、感知、计算、智能一体化能力,作为分布式AI节点广泛存在于网络中。终端侧的复杂数据处理、终端与网络之间的模型参数传递等将带来额外的计算能耗与通信能耗,给6G网络节能带来新的挑战。

基于联邦学习等分布式机器学习技术,将计算任务卸载到网络中分布的智能终端或边缘节点,并基于系统能效最大化的原则,选择高能效的分布式节点参与协同计算,可以充分利用网络中分散的计算、通信与能量资源。通过任务卸载可降低中心节点的负荷与能耗,同时,由于数据无需传输到中心节点,也可减少数据传输带来的通信能耗。

4 结束语

作为新一代信息服务网络,6G将向算网一体、绿色共享、智能原生等方向演进,具备绿色内生的能力,满足可持续发展需求。不同于现有的通信网络节能技术,绿色内生作为6G网络的固有能力,不局限于某个网元,不仅仅是单一的、外挂式的功能或技术,而是贯穿于网络架构、资源调度、空口传输以及智能节能等多要素多环节中。

目前,6G网络架构与空口新技术研究已取得一定进展,但关于6G绿色网络技术的研究还在探索阶段。本文提出了6G绿色内生网络的使能技术框架,从绿色组网、通感算智协同调度、绿色空口以及AI智能节能等方面分析了潜在的技术方案,助力6G绿色内生网络的构建。

参考文献:

[1] YRJÖLÄ S, AHOKANGAS P, MATINMIKKO-BLUE M. White paper on business of 6G[R/OL]. [2025-01-15]. [https://oulurepo.oulu.](https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/36423/isbn978-952-62-2676-7.pdf?sequence=1)

fi/bitstream/handle/10024/36423/isbn978-952-62-2676-7. pdf? sequence=1.

- [2] ITU. Focus group on technologies for network 2030[R/OL]. [2025-01-15]. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>.
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R/OL]. [2025-01-14]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbq/202106/P020210604552572072895.pdf>.
- [4] 朱伏生,赖峥嵘,刘芳. 6G无线技术趋势分析[J]. 信息通信技术与政策,2020(12):1-6.
- [5] 中国联合网络通信有限公司研究院. 中国联通6G白皮书V1.0[R/OL]. [2025-01-14]. <https://aijishu.com/a/106000000195303>.
- [6] 翟立君,王妮炜,潘沐铭,等. 6G无线接入关键技术[J]. 无线电通信技术,2021,47(1):1-11.
- [7] 中国联通研究院. 中国联通5G智能节能技术白皮书v3.0[R/OL]. [2025-01-14]. <https://www.docin.com/p-4663154797.html>.
- [8] 李红五,吕婷,李福昌,等. 5G无线网络节能体系研究与展望[J]. 邮电设计技术,2022(8):6-11.
- [9] 吕婷,张涛,曹亘,等. 6G网络节能技术研究[J]. 邮电设计技术,2023(12):50-55.
- [10] YI Z L, WANG S, HAN S F. From 5G to 6G: requirements, challenges and technical trends[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(2):1-9.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] BORYLO P, TORNATORE M, JAGLARZ P, et al. Latency and energy-aware provisioning of network slices in cloud networks[J]. Computer Communications, 2020, 157:1-19.
- [14] VON PERNER J, FRIDERIKOS V. Green future networks: network energy efficiency[EB/OL]. [2025-01-15]. <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/211009-GFN-Network-Energy-Efficiency-1.0.pdf>.
- [15] CHAI R, ZOU F, LIU S, et al. 6G mobile communication: vision, key-technologies and system architecture[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(3):337-347.

作者简介:

吕婷,高级工程师,硕士,主要从事无线网络设备及节能技术研究工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,主要从事移动通信及固网移动融合等专业的课题研究工作;张忠皓,教授级高级工程师,博士,主要从事6G新技术研究及相关工作;曹亘,教授级高级工程师,博士,主要从事无线网络新技术、标准化研究工作。