

6G 网络节能技术研究

Research on Energy Saving Technology for 6G Network

吕婷,张涛,曹亘,李福昌(中国联通研究院,北京 100048)

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

摘要:

作为未来新一代信息基础设施,6G网络自身的绿色低碳发展对于通信行业“双碳”战略实施至关重要。为了从根本上提升6G网络能效水平,分析了6G网络节能的需求与挑战,构建了6G网络节能技术体系,重点探讨了6G网络绿色内生及高效运行的使能技术。

关键词:

6G;节能技术体系;能效;双碳
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.12.011
文章编号:1007-3043(2023)12-0050-06
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 infrastructure for the future, the green and low-carbon development of 6G network is crucial for the implementation of the "Dual-carbon" strategy in the communication industry. In order to fundamentally improve the energy efficiency level of 6G network, the requirements and challenges of 6G network energy saving are analyzed, and a 6G network energy saving technology system is constructed. The enabling technologies for green endogenous and high-efficient operation of 6G network are emphatically discussed.

Keywords:

6G; Energy saving technology system; Energy efficiency; Dual-carbon

引用格式: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.

1 概述

5G主要面向增强型移动宽带(eMBB)、大规模机器类型通信(mMTC)和超可靠低延迟通信(uRLLC)三大典型应用场景。随着远程全息、触觉通信、超能交通、全域应急通信、数字孪生、智慧生产等各类新应用的涌现,用户对覆盖、数据传输速率、端到端时延等网络性能指标提出更严苛的要求,当前5G网络技术和

性能指标存在一定的局限性。

为了有效应对新兴信息业务的需求,当前世界各国已相继启动6G技术研发。IMT-2030(6G)推进组已发布系列6G白皮书,在6G愿景、需求及关键性能指标方面,业界基本达成共识,6G关键技术研究方面已逐步收敛,将超大规模MIMO、通信感知一体化、智能超表面、内生AI、数字孪生、内生安全等技术作为6G潜在技术,对于全双工、轨道角动量等新技术的研究也取得阶段性进展。在6G网络性能方面,业界提出了峰值速率1Tbit/s、用户面时延0.1ms、频谱效率200~

收稿日期:2023-10-09

300 bit/s/Hz等关键指标。与5G相比,6G的性能要求显著提高,大多数性能指标相比5G提升10~100倍。

在中国力争2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”的背景下,5G网络作为数字经济发展的关键基座,已成为当前国家“双碳”战略的重要发力点。未来,6G网络将作为数字世界的新一代超级基础设施,网络能力将大幅提升,面临绝对能耗持续增加的压力。为了推动通信网络绿色低碳高质量发展,需要将节能作为6G网络的发展目标与内在约束,构建新一代绿色低碳网络。

2 面向6G的无线网络节能技术演进

2.1 5G网络节能技术现状及发展趋势

节能技术一直都是无线网络关注的热点,伴随着通信技术的代际更替,节能技术也不断发展演进。目前,4G/5G无线网络主要采用网络层、站点层、设备层三级节能体系。设备层节能技术主要从基站硬件、软件特性方面挖掘设备的能效潜力,一方面通过改进硬件设计、提高平台集成度、采用新工艺、新材料等降低设备的基础功耗,另一方面通过开启符号关断、通道关断、载波关断等节能特性以更高效率的调用网络资源、降低设备动态功耗。站点层节能技术主要通过电源、备电、空调等配套设施的智能化管控,在满足业务需求的同时降低站点能源消耗。网络层节能技术以全网能耗最优为目标,基于AI技术实现业务精确预测并自动生成节能策略,使网络资源与能源调度适配于业务变化,实现对多制式网络的协同节能管理。

未来,随着大数据、人工智能等技术的进一步发展,网络层节能技术将持续向高级智能化方向演进,基于海量的数据以及精准预测与意图感知能力,使能更加实时化、智能化的节能控制。在站点层节能方面,将通过重构站点形态、融合清洁能源等,打造绿色站点,提升站点能效。此外,网络架构也是影响能效的重要因素,可通过简化网络架构,应对多模多频网络并存、频谱碎片化、设备多样化导致的网络复杂化、能耗大等问题,推动无线网络绿色低碳化发展。

2.2 6G网络节能需求与挑战

6G在5G基础上,将从服务于人、人与物,进一步拓展到支撑智能体的高效互联,将实现由万物互联到万物智联的跃迁,最终将助力人类社会实现“万物智联、数字孪生”美好愿景。为了实现这一美好愿景,6G网络将融合地面移动通信、近地空间平台、无人机平

台、中低轨卫星等通信技术,将二维网络覆盖升级为三维立体网络,实现空天地一体化的全覆盖,消除边远地区的数字鸿沟。同时,为了满足更加丰富的业务应用以及极致的性能需求,6G将采用内生智能的新空口和新型网络架构,使网络能力在5G的基础上进一步跃升。

目前,5G正处于高速发展期,预计到2025年,我国每万人将拥有26个5G基站,5G基站总数将不少于360万。到6G时代,随着频谱向太赫兹、可见光等更高频段延伸,无线信号的传播能力将显著下降,为了实现与5G相当的覆盖,6G基站部署规模将会是5G的数倍之多,相应地,6G网络对能耗的需求将是巨大的。

为了应对6G高能耗的挑战,推动6G绿色低碳化发展,业界对6G网络的能效指标提出了更高的要求。能效指标用于衡量能量有效转化效率,在传递相同信息量的前提下,网络能效越高,则消耗的能量越少。预计6G网络的能效指标将是5G的10~100倍,以期通过能效水平的提升,缓解6G绝对能耗激增的压力。

2.3 6G网络节能技术体系

无线网络的基础能效水平与系统设计紧密相关,网络架构、信令流程、无线空口传输技术等都是影响网络能效的重要因素。在5G系统设计过程中,主要以传输速率、时延、连接密度等网络性能指标为设计目标,节能技术是作为在标准化协议及网络架构基础上的叠加功能引入的,主要通过在网络运行阶段使能资源与业务的动态适配,适时关断部分硬件资源以达到节能的效果。5G节能技术虽然可以在业务闲时降低部分能耗,但不能从根本上提升系统的基础能效,节能效果有限。

为了从根本上提升网络基础能效水平,6G网络需要在系统研发的早期阶段就引入节能理念,构建绿色内生的6G网络。为此,6G节能技术体系将在5G的三级节能体系基础上进一步扩展,涵盖端到端全生命周期的节能。在系统设计阶段,将绿色节能作为目标与约束条件,在架构设计及协议栈设计过程中充分考虑能效因素,将绿色网络架构、零信令开销以及高效无线传输技术等网络绿色内生的使能技术进行标准化,实现系统传输能力最大化、能耗最小化,提升系统自身的基础能效水平。在系统运行阶段,引入可重构组网技术,实现动态按需组网;采用智能资源管理及智能关断等技术,提升网络资源以及能源的使用效率,使能6G网络高能效运行。

此外,6G也可复用现有的设备层、站点层、网络层节能技术,从多维度降低网络运行能耗。在设备层,引入高能效的芯片、器件及硬件平台,开启软件关断功能,降低设备级功耗;在站点层,执行站点基础设施的智能监测与管控,打造绿色站点;在网络层,基于智

能化云平台实现多制式网络协同的智能化节能(见图1)。

3 6G网络绿色内生的使能技术

3.1 绿色网络架构

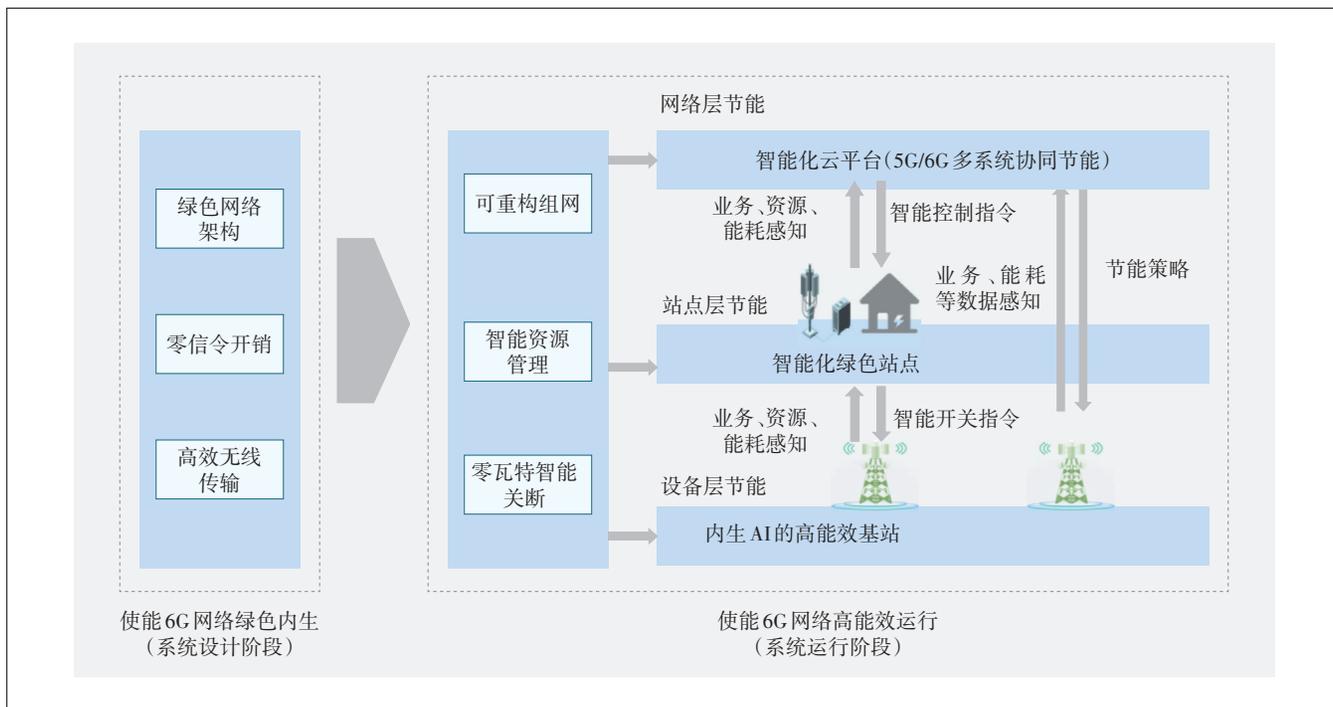


图1 6G网络节能技术体系架构

网络架构与形态是影响网络性能与能效水平的重要因素。5G时代主要实现从城市到乡村的全面覆盖,网络形态以传统的蜂窝小区组网架构为主,形成多频层、多制式、宏微协同的覆盖模式。为了满足差异化的覆盖需求,现网呈现多网并存、频谱碎片化、设备多样化的格局,导致网络架构复杂化、能耗大等问题。

6G将实现万物智联,网络覆盖目标将由地面覆盖扩展到太空、空中、陆地、海洋等更多自然空间,实现全球全域的“泛在连接”。此外,下一代无线网络还需要赋能千行百业,支持多样化终端接入,满足差异化的业务性能要求,对数据速率、连接数、时延等网络性能指标以及组网的灵活性均提出了更高的要求。因此,传统的蜂窝网络架构不足以支撑6G网络的愿景目标。为了实现万物智联、绿色低碳的发展目标,6G网络架构将发生颠覆式重构,无线网将打破传统的有边界的、烟囱式的架构,支持融合泛在、绿色节能的新一代网络架构。

6G绿色网络将采用空天地一体化组网,通过天基网络、空基网络、地面网络3层组网,形成以地面网络为基础、以天基网络和空基网络为拓展的立体全域覆盖网络。地面网络与非地面网络互联互通、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。基于内生智能,充分利用网络节点的通信、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,保障用户为中心的业务感知和最优的网络能效。

地面与非地面网络层可采用超蜂窝、无蜂窝等符合绿色通信发展趋势的新型组网架构。超蜂窝采用控制面与用户面解耦的架构,控制基站与业务基站可以独立按需部署,前者用于提供用户接入以及控制信号的传递,可采用大区覆盖模式;后者用于为用户提供高速数据传输,可按需灵活部署。无蜂窝构架基于“以用户为中心”的理念,网络中部署多个分布式接入点以及一个与所有接入点相连接的中央处理单元,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,形成一个“超级基站”覆盖整个区域。每个用户接入一组特定的接入点,可以利用空间宏分集和低路径损耗提升网络的频谱效率和能量效率。

6G绿色网络架构以空天地一体化组网为基础(见图2),融合超蜂窝、无蜂窝技术,通过多站点协同覆盖,可实现系统能效最大化。具体来说,超蜂窝架构中的控制基站可位于天基或空基网络层,提供更大范围、连续的信令覆盖,以保障用户接入的连续性;地面业务基站则可按需部署在热点区域,根据业务潮汐效应动态休眠,以降低基站能耗。此外,地面网络还可采用无蜂窝架构,基于对接入点的智能化控制,实时关闭无用户接入的接入点,以进一步节省系统能耗。通过引入绿色网络架构,可减少地面业务基站部署数量,同时结合动态休眠技术,预计总体网络能效可提高1~2倍。

3.2 高效无线传输技术

6G网络将在5G的基础上,进一步增强多天线、调制编码、双工等物理层技术,探索新的物理维度和传输载体,实现信息传输方式的革命性突破。通过在6G网络中引入更高效的无线传输技术,可以提高空口传输效率,减少数据传输所需的频谱与功率资源开销,实现用更少能量传递更多信息,从而提升网络能效。

多天线技术作为提升频谱效率最有效的技术手段,已在现有网络中得到广泛应用,基站的收发天线数从3G支持的1T1R增加到5G的64T64R,5G商用设备已普遍采用大规模MIMO技术。随着天线和芯片集

成度的不断提升,天线阵列规模还将持续扩大,由大规模MIMO向超大规模MIMO进一步演进,不断向更高空间维度扩展。超大规模MIMO通过大幅增加天线数至数千乃至更高数量级,更为深入地挖掘空间资源,从而大幅提高频谱效率。超大规模MIMO设备具有超高增益,可有效补偿高频段传输带来的高路径损耗,能够在不增加设备发射功率的前提下扩大覆盖范围,从而实现更高的能量效率。此外,超大规模MIMO设备还具有在三维空间内进行波束调整的能力,除地面覆盖之外,还可以提供非地面覆盖,更好地满足全域泛在覆盖需求。

基于无蜂窝架构的分布式大规模MIMO是提高系统覆盖与容量性能的另一有效方案。可通过大量不同地理分布的低功耗接入点之间的协作,实现大范围连续均匀的覆盖,提高覆盖率,并利用接收分集对抗阴影衰落效应,降低用户干扰,使用户获得良好的信道条件,从而提升频谱效率。分布式大规模MIMO系统利用多个接入点共同为用户提供服务,消除了小区边界,实现了以用户为中心的服务架构。

在物理层技术增强方面,可采用新的编码调制技术、多址接入技术、全双工技术、设计新波形、优化信号结构等,提升系统频谱效率。比如,极化编码技术为6G网络逼近信道容量极限提供了可能,编译码复杂度以及误码率都较低。准循环低密度奇偶校验码具有很高的译码效率和并行性,适合高吞吐量业务。AI编码可基于强化学习、神经网络及遗传算法等在大量码字集合中学习最优码字的参数,从而优化编码设

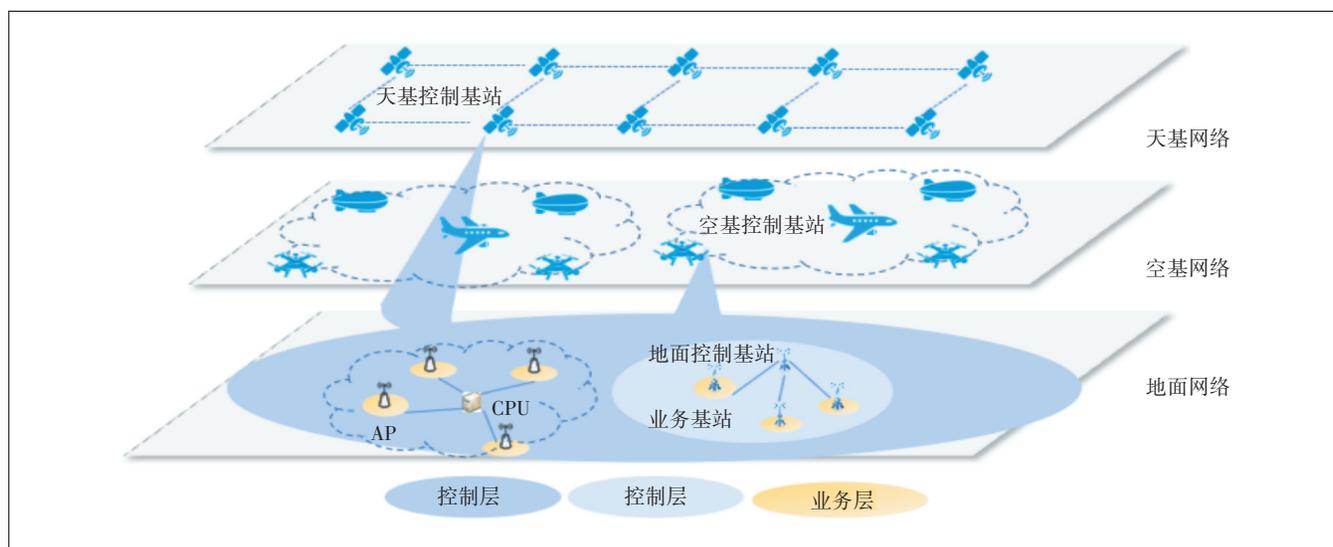


图2 6G绿色网络架构

计。全双工技术可以使上行和下行同时传输,在不占用额外带宽的情况下提高频谱复用能力。此外,还可采用OTFS调制、概率成形调制、基于免调度的非正交多址接入等潜在的新技术,提升系统传输效率。

6G网络还将探索新的物理维度、新型信息传输模式,以提高空口能力,如轨道角动量和智能反射表面技术。电磁波轨道角动量提供了除频率、相位、空间之外的另一个维度,利用不同模态数的电磁涡旋波间的相互正交性,可以在同一载波上将信息加载到具有不同轨道角动量的电磁波上,提高数据传输能力。智能反射表面技术可以利用软件控制反射面上每个反射单元的电磁性质,以可编程的方式对空间电磁波进行智能调控,使传播环境得以重新配置,以改善无线链路性能。综合考虑潜在的物理层增强技术带来的空口性能收益,通过高效无线传输技术将能效提高2倍左右。

3.3 零信令开销

在无线网络中,同步信号、系统消息和寻呼消息等公共信号是系统信令开销的主要组成部分,影响空口资源使用效率,造成功率资源浪费。6G将引入更多频段和更大带宽,在多载波组网场景下,每个载波都需要发送公共信号,配置公共和专用的控制信道,从而导致更高的信令开销,影响网络能效水平。

为了构建6G绿色空口,可通过降低公共信号开销的方式提升系统能效。在小区低负荷场景下,可减少公共信号的传输次数,使小区有更多时间进入关断或休眠的节能状态,降低系统能耗。在多载波场景下,还可基于多载波之间的协同,将多个载波的系统消息汇聚在一个载波上传输,不发送系统消息的载波则可进行更长时间的关断,在降低公共信号开销的同时降低能耗。

另一方面,还可通过极简传输技术实现零信令开销。传统蜂窝系统中,终端接入网络需要复杂的信令交互与调度过程,这会造成很大的开销。6G面向万物互联的场景,连接数与5G相比将提升10~1 000倍,传统基于蜂窝连接的传输方式将导致信令风暴和功耗增加。面向海量连接需求,6G绿色网络可在无蜂窝架构的基础上,结合多域多用户联合接收、稀疏导频技术等,使终端无需复杂信令交互即可发起传输,并在传输结束后适时进入休眠状态,实现零信令开销、低功耗的极简传输。采用零信令开销技术,可以节省公共信号传输所需的功率等空口资源,使系统能效提升

30%以上。

4 6G网络高效运行的使能技术

4.1 可重构组网

现有的无线网络组网模式以物理小区为核心,以“烟囱式”协议栈的方式将控制面与用户面功能绑定在一起,网元功能与硬件紧耦合,网络服务依附于某个网元,这种模式在一定程度上限制了网络资源效用,难以满足多样化、复杂化的业务需求。

6G网络可采用可重构组网技术,根据用户行为以及业务特征动态按需组网。基于软件定义网络和网络功能虚拟化等技术,将网元功能软件化,打破硬件的限制,消除不同网元功能之间的耦合性,使得网元功能可以更加精细化灵活分配和动态部署。同时,不同网元的功能可根据应用场景动态重构,也可以独立演进,以适应未来更多新的应用场景。可重构组网技术可以在提供高质量通信服务的同时,有效提升网络资源效用,符合绿色通信发展趋势。

4.2 智能资源管理

无线网络的能效与资源使用效率、业务负荷变化紧密相关,如何在满足用户服务质量要求的前提下通过智能资源管理提高网络资源利用率,是提高网络运行效率的关键。目前,基于5G网络的智能化资源调度与节能控制,可以达到10%~20%的节能效果。未来随着大数据、人工智能等技术的快速发展,网络资源管理将更加实时化、智能化、协同化,使资源动态适配于业务变化,实现业务流、资源流以及能量流的匹配,最大化网络资源和能源利用率,基于智能资源管理将获得更大的节能收益。

在设备层,增强基站对业务、资源、能耗等指标的感知能力,基于内生AI对用户行为与业务需求进行预测,按需对空域、频域、时域等多域资源进行智能化调度,达到能耗、网络性能、业务体验的最佳平衡。此外,基站侧还可引入网络低负载节能技术,通过不同粒度的小区休眠、MIMO层适应等技术,对空口资源进行灵活调度以节能。

在站点层,采用大数据及数字孪生技术,对站点基础设施进行统一监测和管理,根据系统运行状况及能耗、碳排放以及环境数据的实时感知生成节能控制策略,控制电源、空调等设施的工作状态,提高供电效率和制冷能效。

在网络层,基于集中式或分布式AI进行业务需求

预测、场景自动识别,对5G/6G多制式网络资源进行智能化协同调度,在满足业务需求的前提下尽可能降低全网能耗。此外,在6G绿色网络架构下,每个分布式基站或接入点可实时监测网络状态,由控制基站或中央处理单元对多个设备的资源进行协同调度,形成以用户为中心的弹性网络覆盖与资源配置,可最大化网络资源利用率,降低能耗。

4.3 零瓦特智能关断

5G网络主要采用符号关断、通道关断、载波关断等不同粒度的关断技术降低设备能耗,但受限于可关断时长以及设备唤醒时延的影响,节能效果有限。在6G绿色网络架构下,可基于超蜂窝、无蜂窝实现更加灵活、智能的关断。在超蜂窝网络中,同一个控制基站覆盖范围内可部署多个业务基站,控制基站提供广域底层覆盖,在不影响用户接入的前提下,业务基站可根据业务负荷变化动态休眠。在无蜂窝网络中,广泛分布的多个低功耗接入点可以根据用户的位置感知适时关断与开启,同时满足覆盖与节能的要求。由此,基于6G绿色网络架构并结合通信电源一体化智能控制,可以实现在不影响业务的前提下,对业务基站或接入点的供电状态进行智能控制,达到“零比特、零瓦特”的目标。

5 结束语

6G作为未来数字世界的基础设施,实现绿色低碳化发展对于通信行业“双碳”战略实施至关重要。从5G到6G,网络技术持续演进、设备能力迭代提升、部署规模逐步扩大,推动6G网络性能大幅跃升,同时也带来更大的节能降碳的挑战,高能效成为6G网络发展的重要目标。

目前,6G正处于技术预研与探索阶段,为了从根本上提升网络能效水平,有必要在6G研发的早期阶段就开展绿色节能技术研究,构建6G网络节能技术体系,将绿色节能的理念融入网络架构、信令流程、无线传输技术等系统设计的每个环节,实现绿色内生的6G网络。同时,通过组网、资源管理以及关断技术等方面的创新,可进一步使能高能效的6G网络运行,实现6G网络全生命周期的节能管理。

随着6G技术研发以及标准化工作的推进,后续需要探索更多维度的绿色节能技术。比如,进一步优化数据与信令传输机制、增强休眠模式设计、增强空口内生智能等,多措并举,持续提升6G网络能效。此外,

还需要协同推进新型绿色材料、清洁能源、高能效芯片等6G产业链上下游节点的绿色化进程,最终实现6G全产业链的绿色高质量发展。

参考文献:

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[EB/OL]. [2023-08-09]. <https://www.eet-china.com/news/202106090412.html>.
- [2] 中国联通研究院. 中国联通5G智能节能技术白皮书V3.0[EB/OL]. [2023-08-09]. <https://www.iotku.com/News/702212755817496576.html>.
- [3] 中国联通研究院. 中国联通6G白皮书V1.0[EB/OL]. [2023-08-09]. <http://221.179.172.81/images/20210322/30691616408868127.pdf>.
- [4] International Telecommunication Union. ITU-T technical report: focus group on technologies for network 2030; FG-NET2030[R]. Geneva:ITU,2020.
- [5] YRJOLA S, AHOKANGAS P, MATINMIKKO-BLUE M, et al. White paper on business of 6G[EB/OL]. [2023-08-09]. <https://arxiv.org/abs/2005.06400>.
- [6] 唐雄燕,李福昌,张忠皓,等. 6G网络需求、架构及技术趋势[J]. 移动通信,2021,45(4):37-44.
- [7] 吕婷,张猛,曹亘,等. 5G基站节能技术研究[J]. 邮电设计技术,2020(5):46-50.
- [8] 刘超凡,李新,贝斐峰. 建立绿色6G网络的关键因素及挑战[J]. 电信快报,2022(2):20-24.
- [9] 杨立. 5G-NR蜂窝系统功能演进趋势分析[J]. 无线电通信技术,2020,46(3):310-314.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 易芝玲,王森,韩双锋,等. 从5G到6G的思考:需求、挑战与技术发展趋势[J]. 北京邮电大学学报,2020,43(2):1-9.
- [13] 李文璟,喻鹏,张平. 6G智能内生网络架构及关键技术分析[J]. 中兴通讯技术,2023,29(5):2-8.
- [14] 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, 2020, 64(1): 110301.
- [15] 柴蓉,邹飞,刘莎,等. 6G移动通信:愿景、关键技术和系统架构[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),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;张涛,高级工程师,硕士,主要从事移动通信新技术研究及相关工作;曹亘,高级工程师,博士,主要从事移动通信网络新技术、标准化研究工作;李福昌,教授级高级工程师,博士,享受国务院特殊津贴,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。