

6G 绿色网络发展趋势和关键技术



Development Trends and Key Technologies of 6G Green Networks

李福昌/LI Fuchang, 郭希蕊/GUO Xirui

(中国联合网络通信集团有限公司研究院, 中国 北京 100048)
(Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd,
Beijing 100048, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231211.1113.002.html>

网络出版日期: 2023-12-11

收稿日期: 2023-10-16

摘要: 6G 网络将驱动无线网络进入万物智联, 但也面临能耗巨大的挑战。提出了构建泛在智简、绿能降碳的 6G 绿色网络的愿景, 并分析了 6G 绿色网络的关键技术问题, 包括网络架构和协议智简技术、先进天线技术、智能资源管理技术和动态关断技术等。介绍了实现 6G 绿色低碳设备的一系列技术, 包括高效芯片技术、高效信号处理技术、高效功放技术以及新型材料技术, 并针对 6G 网络与绿色能源融合技术以及分布式微电网协同技术进行了分析。

关键词: 绿色网络; 绿色设备; 绿色站点; 绿色能源

Abstract: The 6G network will drive wireless networks into the era of intelligent connection of all things, but it also faces the challenge of huge energy consumption. The vision of building a 6G green network that is ubiquitous, intelligent, simple, green, and carbon-reducing is proposed, and the key technical issues of the 6G green network are analyzed, including network architecture and protocol intelligent simplification technology, advanced antenna technology, intelligent resource management technology, and dynamic shutdown technology. A series of technologies for realizing 6G green and low-carbon devices are introduced, including efficient chip technology, efficient signal processing technology, efficient power amplifier technology, and new material technology. Finally, the integration technology of the 6G network and green energy and the collaborative technology of distributed microgrid are analyzed.

Keywords: green network; green equipment; green site; green energy

引用格式: 李福昌, 郭希蕊. 6G 绿色网络发展趋势和关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 54-59. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306009

Citation: LI F C, GUO X R. Development trends and key technologies of 6G green networks [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 54-59. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306009

随着移动通信近 10 年的快速发展, “4G 改变生活, 5G 改变社会” 带动了数字经济的高速发展, 5G 更是作为新型数字基础实施的重要技术在网络强国、数字中国、智慧社会中发挥了重大作用。基于移动通信发展红利, 人民对于 6G 技术愿景充满了更高的期待。6G 通信网络面向用户, 将更加智能化、数字化, 为工业互联网和物联网提供可靠的网络通信。

在移动通信技术发展历程中, 虽然网络设备能效不断提升, 但随着网络频率升高、带宽增大、规模增长, 网络能耗呈现持续增长的趋势, 未来 6G 网络面临严重的能耗挑战。如何在网络服务能力持续提升的基础上实现碳达峰、碳中和是 6G 网络发展中的关键问题。本文从绿色网络技术、绿色低碳设备、绿色站点技术、绿色能源技术等角度提出了构建泛在智简、绿能降碳的 6G 绿色网络^[1]。

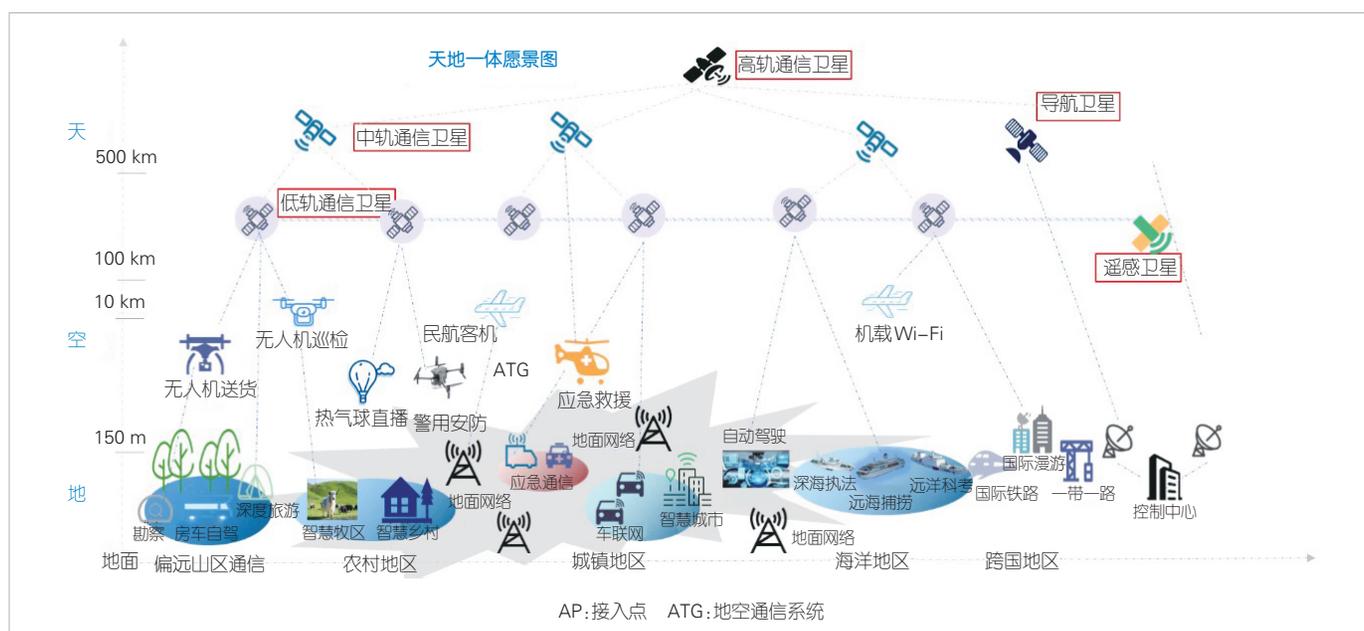
1 6G 绿色网络技术

6G 网络覆盖涵盖空天地海等全球全域场景, 网络架构如图 1 所示。6G 网络需要在“泛在连接”的基础上通过架构智简、协议智简、组网智简构建绿色低碳的网络体系^[2]。

1.1 架构智简技术

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、绿色节能的新型网络架构。

6G 绿色网络架构将支持空天地一体化组网, 通过卫星网络、空基网络、低空及地面网络 3 层组网, 形成以地面网络为基础、以非地面网络为拓展的立体全域覆盖绿色节能网络。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



▲图1 6G绿色网络架构

生智能，6G网络将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。

6G绿色网络架构中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方式。

在超蜂窝架构下，基站控制面与用户面解耦，控制基站与业务基站可以独立按需部署。前者提供用户接入以及控制信号的传递，可采用大区覆盖模式；后者为用户提供高速数据传输，可按需灵活部署。同一个控制基站覆盖范围内可以部署多个业务基站，且业务基站可根据业务负荷变化动态休眠。在该架构下，网络覆盖可跟随业务需求动态调整，在不影响覆盖性能的前提下通过控制业务基站适时进入休眠状态，实现更为灵活的休眠，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。当区域内用户较少时，可以关断部分接入点，进一步节省系统能耗。

1.2 协议智简技术

协议智简是通过极简信令优化降低信令开销实现能耗的降低，主要方法包括优化信令接口，减少冗余信息，采用压

缩编码技术等。协议智简技术有助于提高通信系统的效率和稳定性，同时降低能耗和资源占用。

在小区低负荷时，减少公共信号的传输次数，可以使小区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，基于多载波之间的协同，可以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在低负荷时关断，在降低公共信号开销的同时降低能耗。

面向海量连接需求，6G绿色网络结合多域多用户接收技术、稀疏导频技术等，使终端无须复杂信令交互即可发起传输，适时进入休眠状态，从而实现零信令开销、低功耗的极简传输。

1.3 先进的天线技术

6G网络将结合超大规模多输入多输出（MIMO）、分布式MIMO、智能超表面等先进的天线技术和设备实现网络智能高效精准的网络覆盖，提升网络覆盖效能。

1) 超大规模MIMO技术

MIMO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了广泛应用，基站的收发通道数从3G支持的1T1R扩展为5G设备的64T64R。未来6G网络随着频段升高，电磁波波长也变短，将采用超大规模的天线阵列，可以产生宽度更小、能量更加集中的波束，并精确指向目标用户，以应对超高频的带来的大路径损耗。这不仅提升了覆盖和容量，而且大幅度减少了每比特能耗。

2) 分布式MIMO技术

分布式MIMO^[3-4]支持以用户为中心的智能接入网架构,利用多天线带来的空间自由度,及对信号空时频特性的联合优化,增强通信系统干扰抑制能力,使用户获得良好的信道条件,更好地保障业务质量在地理分布上的均衡,实现用户体验速率、边缘覆盖性能的明显改善,同时实现设备能效提升。

3) 智能超表面技术

可重构的智能超表面(RIS)技术^[5-6]采用了可编程的新型电磁散射材料,通过调控超表面天线单元的相位、幅度或极化方向,大幅改善电磁波传播环境,从而达到扩展无线信号覆盖,提升小区吞吐量的效果^[7]。

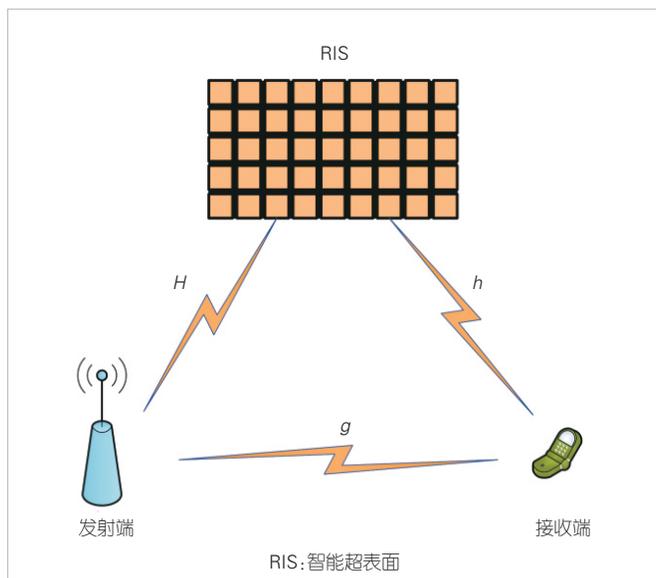
图2为智能超表面辅助的通信系统模型,其中接收端接收到的信号 y 为:

$$y = \sqrt{\beta} (h\phi H + g)s + n. \quad (1)$$

从发射端经过RIS到达接收端的等效信道 $h\phi H$ 为RIS与接收端间信道 h 、RIS的可调相移对角矩阵 ϕ 以及发送端与RIS间信道 H 的乘积, g 为接收端和发射端之间的直达信道。 s 是发送端发送的信号, n 为高斯白噪声。当使用RIS辅助通信时,RIS单元反射的信号可以表示为入射信号与该单元反射系数的乘积。

RIS技术的特点是以低功耗的方式智能调控大规模低成本的无源天线单元,从而重构无线环境,实现最佳的覆盖、更优的用户体验。

4) 轨道角动量技术



▲图2 智能超表面辅助的通信系统模型

轨道角动量(OAM)技术^[8]可以产生具有不同OAM状态的电磁波,为移动通信系统提供了一种新型信道复用技术。利用不同模态数的电磁涡旋波间的正交性,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,提高系统容量和提高频谱利用率。系统容量可以写为电场强度信道容量 $C^{(E)}$ 和OAM信道容量 $C^{(O)}$ 之和^[9-10]即:

$$C = C^{(E)} + C^{(O)} = \sum_{n=1}^N B_n \log(1 + \eta_{\text{SNR},E}^{(n)}) + \sum_{m=1}^M W_m \log(1 + \eta_{\text{SNR},O}^{(m)}) \quad (2)$$

其中, N 和 M 分别为电场强度和OAM的信道个数, B_n (或 W_m)分别为第 n (或 m)个信道的电场强度带宽(或OAM带宽), $\eta_{\text{SNR},E}^{(n)}$ (或 $\eta_{\text{SNR},O}^{(m)}$)分别为第 n (或 m)个信道的信噪比。

1.4 智能资源管理技术

无线网络的能耗与资源使用效率、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6G绿色网络构建需要重点关注的问题。随着大数据、人工智能(AI)等技术的快速发展,网络资源管理将更加实时化、智能化,资源随业务负荷变化灵活调整,达到提高网络资源和能源利用率的目标。

在无线设备层面,借助AI技术,可以在网络业务量、资源使用率、能耗等指标感知与评估的基础上,基于业务精准预测,对空域、频域、时域等多域资源进行智能化协同调度,实现以用户为中心的资源与能源灵活配置,达到能耗、网络性能、业务体验的最佳平衡。例如,时分复用(TDM)帧结构是一种可以实现网络侧和终端的节能帧结构设计,AI可以根据实时的网络状态和用户需求,自动调整使用合适的帧结构等。此外,在无蜂窝、超蜂窝绿色网络架构下,每个分布式基站可实时监测网络状态,控制基站或中央处理单元对多个基站或接入点进行协同的资源调度,形成以用户为中心的覆盖与资源配置,充分利用网络资源,降低能耗。例如,通过AI技术可以对计算任务进行分析和预测,确定哪些任务可以被卸载,并将计算任务卸载到合适的设备上。根据设备的能耗和性能等因素,AI还可以动态调整计算任务的分配,以实现最佳的节能效果。

在站点基础设施层面,需要基于能源管理数字化转型,将能源基础设施打造成一张数字化和智能化的网络。一方面,基于大数据技术实现自动开站、自动联网、智能运维、全生命期资源管理,提升能效和运维效率;另一方面,根据能耗、碳排放数据以及环境数据的实时感知,智能控制电源、空调等设施的工作状态,节省能源消耗。

此外，AI技术与数字孪生等技术结合，可以实现数据驱动的决策与优化。孪生网络可以模拟网络的服务、环境、负载和网络设备的性能、能耗情况，实时监测网络的运行状态和能耗情况。同时，数字孪生可以对网络进行模拟优化，为AI提供参数输入和决策支持，从而帮助AI提出更有效的节能方案。

1.5 基于L1/L2的新型动态关断节能技术

目前，传统的节能关断技术主要是基于高层和半静态的负荷预测和用户连接数预测，存在省电状态切换慢、基于历史负荷而非当前实时负荷的预测等问题，无法在不牺牲容量的条件下大幅度降低基站功耗。

新型动态关断技术主要基于基站的能效感知的动态调度器^[1]，可以根据实时负荷水平、无线信道质量和实时可用资源做最优调度，实现时域关断、通道关断和下行功率控制毫秒级的快速状态切换，可以在几乎不牺牲容量的条件下大幅度降低基站功耗。动态通道关断示意如图3所示。

2 绿色低碳设备

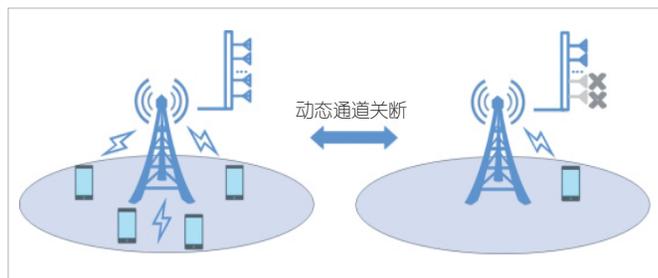
未来6G网络，在信号瞬时带宽方面将会超过1 GHz以上，工作频率也会达到100 GHz频段甚至太赫兹。针对高频大带宽设备，芯片技术、信号处理技术和器件在能耗方面将面临诸多新问题和新的挑战。

2.1 高效芯片技术

6G网络将驱动无线网络进入万物智联，基站系统要实时处理达到Tbit/s的数据流量。这对芯片性能提出了更高的要求，芯片的能耗将成倍提升。下文中通过对芯片制程、封装工艺、异构芯片等技术研究，我们探索芯片的节能降耗技术。

1) 先进制程

制程节点越小意味着晶体管越小，速度越快，那么能耗表现就越好。超高集成度的6G基带及数字中频芯片，配合



▲图3 动态关断示意图

使用超高集成度的射频前端，可以全面降低6G基站的整机功耗。

2) 基于Chiplet的芯片封装集成技术

采用跨工艺、跨封装的Chiplet多芯粒互联技术和面向通用小芯片互连通道(UCIe)标准的Chiplet接口IP设计等先进技术，可以实现更高的系统集成度，在同等单位面积硅片上集成更多数量的晶体管，提升晶体管密度，实现芯片的节能。

3) 专用芯片和通用芯片技术

采用领域定制(DSA)的异构计算，将专用芯片和通用芯片进行融合，并采用中央处理器(CPU)/通用处理器(GPU)/网络处理器(NPU)/现场可编程门阵列(FPGA)/专用集成芯片(ASIC)来完成对特定业务的加速，从而达到提升系统算力的目的。

2.2 高效信号处理技术

在6G网络高效率目标牵引下，6G系统的基带处理、数字中频、射频信号算法处理需要进行新的设计和优化。

在信道编码方面，新的6G信道编码可以考虑具有内在并行特征的低密度奇偶校验(LDPC)码，降低信道编码的复杂度，同时考虑在牺牲少量性能的条件下追求吞吐量、功耗、灵活性、成本的综合最优，实现最佳的基带芯片节能效果。

在采样带宽方面，欠采样条件下的射频算法处理可以缓解大带宽对模数转换器(ADC)采样芯片造成的功耗压力。但同时要注意欠采样算法模型和计算复杂度不能过高，否则同样会带来算法处理芯片的功耗压力，因此需要在射频器件能效提升和基带处理芯片功耗提升之间做折中考虑。

在降低射频信号峰均比方面，我们可以采用以下两种技术：一是直接设计低峰均比信号，例如，通过改变信号调制方式或帧结构参数，使得处理信号本身就具有低峰均比特性；二是基于传统的峰值因子消减(CFR)算法向大带宽方向进行技术迭代和优化。

在数字预失真(DPD)算法方面，我们采用6G超大带宽和多频段的DPD算法，提升功率放大器(PA)的线性度，从而提升功放效率。同时，还需要解决由相控阵波束成形带来的多个并行PA使用单个DPD算法进行线性化的问题。

在物理层技术增强方面，6G网络还可采用极化编码、概率成形调制、基于免调度的非正交多址接入以及全双工等潜在的新技术，提升系统频谱效率，降低接入开销，在满足6G全业务场景、全类型终端的接入需求的同时提升系统能效。

另外，通信与感知融合技术和反向散射技术也可以提升6G网络的能效。通信与感知的融合使得无线系统可以深度感知无线环境，优化/简化信道测量和干扰测量，从而提升通信的能效。反向散射技术可以有效降低数据传输功耗。终端还可以通过能量采集技术从环境的能量源中收集能量，满足近零功耗终端的通信需求。

2.3 高效功放技术

有统计指出^[12]，无线通信系统近40%功耗来自PA。目前业界采用第3代半导体氮化镓（GaN）技术解决了5G大带宽、高频率的问题，但随着毫米波、太赫兹技术的发展与应用，需要继续提升GaN器件的功放效率。可以通过包络跟踪技术以及Doherty功放+异相Outphasing^[13]发射机技术来提升末端功放效率。在6G PA材料方面，GaN、锗化硅（SiGe）、磷化铟（InP）等材料的使用可以有效提高功率放大器的功率和效率。

2.4 新型材料技术

对于6G超大规模天线的MIMO，新型材料提供了良好的宽带性能和卓越的功率密度及功耗效率，满足严格的热规范，同时为紧密集成的超大规模天线阵列节省了宝贵的芯片空间。

低损绿色天线^[14]通过低损耗新型天线罩、塑料金属化新型阵子、一体化低损耗移相器、免电缆天线设计等技术提高天线电磁转换效能，提高天线覆盖增益，实现相同覆盖范围下发射功率的降低，从而实现整网能效的提升。

高效散热材料采用更高效的散热技术，可降低设备工作温度，从而提升芯片工作能效。目前业界正在开发全新的高导热压铸铝合金材料。该材料较传统压铸铝合金导热系数提升30%，同等产品散热能力提升5%。有源天线处理单元（AAU）及射频拉远单元（RRU）设备散热能力提升可使处理器及功放等器件工作于更低能耗的状态，从而提升设备能效。

3 绿色站点技术

3.1 站点级节能

为有效降低6G网络配套设施能耗与碳排放，大幅减少基站机房及配套设备的建维成本，我们需重构传统建维体系，从系统架构、供电系统、空调系统、绿色能源、智能建维等多个方面着手，提升站点基础设施整体能效和碳效。

1) 构建极简系统架构。坚持“极简建设+低碳高效”

发展模式，基于集成化、标准化、预制化、模块化等核心要素，以智能供电系统、多模式空调系统、新能源及备储一体系统等打造新型系统架构，满足6G网络室内/室外多场景低碳、灵活部署的需求。

2) 提高供电系统效能。聚焦供电设备器件级、设备级、系统级的能效提升，推动氢燃料电池、固态电池及备储一体等新型电池技术落地，加速6G网络能源清洁化，实现电业技术协同，并结合网络级、业务级能耗/碳数据精准采集，全面提升供电系统效能。

3) 提升散热能力。6G站点应因地制宜地充分利用自然冷源，引入AI，实现空调运行状态的智能控制，使空调系统始终运行在最佳能效区间；面向6G设备高功率需求，推动液冷技术在6G站点的应用，提升站点整体散热能力。

4) 打造智能建维。基于动态资源管理技术，构建、运行、维护、再分配及报废的全生命期的建维体系。引入数字孪生技术，以数字化、智能化搭建建维技术体系，实现与新型基础设施结合、自主智能化运行和故障的自我维护等，最大限度降低6G网络建维成本。

3.2 数据中心节能

数据中心的绿色节能低碳发展不再单纯追求极低的电能使用效率（PUE），需要综合考虑可再生能源、算力、信息通信（IT）设备能耗、制冷及供配电设备能效等多方面关键因素，重点关注各系统的高效协同工作，并通过高效制冷、余热回收、多维度能效提升、AI智能控制等节能新技术的应用，配合精细化的运行维护管理，最终实现数据中心的绿色节能。

4 绿色能源技术

随着6G的到来，绿色能源相关产业逐渐成熟，将成为基站系统供电的主要来源之一。6G网络技术将推动绿色能源系统优化配置、控制管理、智能运维等方面的能力提升，增强绿色能源的发电效率、稳定性和安全性。从6G网络能源供给“开源”入手，丰富基础设施的绿色化转型模式，力争打造电力算力协同、资源利用充分、能效优化合理、运行稳定可靠的6G网络绿色能源供给体系。

4.1 6G设备与绿色能源深度融合技术

为解决6G网络耗电量大、增速快、碳排放量高的问题，6G网络需要提高清洁能源供给效率，因此可在6G前端设备中融合光伏电池、新型储能电池、热电转换器等技术，并内置传感器采集绿色能源相关的参数数据，如光照、风速、温

度等,增强6G网络对绿色能源的感知与调节能力,提升6G设备清洁能源的就地消纳能力,减少6G设备高碳排能源输入占比,直接降低6G设备运营阶段碳排放。

4.2 6G网络与分布式微电网协同技术

6G网络时代,会出现大量分布式形态的算力资源。为持续推进节能降碳,我们需要构建相适应的高度分布式形态的绿色能源网络,因此需要将6G网络与绿色能源物联网连接,形成通信-电力系统能量平衡优化机制,提供通信与电力调度需求耦合的通信网-电力网互补支撑,在边缘侧实现源-网-荷-储灵活互动以及海量分布式资源的协同运行,形成电力网络与通信网络的灵活性共享机制,实现跨网的资源优化配置,达到大幅降低6G通信系统碳排放效果,从而提升6G网络与电力系统的能效与碳效。

5 结束语

2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的双碳目标与中国6G技术与网络发展时间正好契合。本文中,我们提出了在网络架构、关键技术、协议简化、绿色设备、绿能融合等方面的技术演进方向,打造绿色低碳的6G绿色网络。未来,我们希望6G网络碳排放强度(单位信息流量碳排放)相比2020年下降90%以上,为2030年实现通信领域碳达峰夯实基础。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021
- [2] 中国移动研究院. 2030+网络架构展望(2020年)[R]. 2020
- [3] 尤肖虎,王东明,王江舟. 分布式MIMO与无蜂窝移动通信[M]. 北京:科学出版社, 2019
- [4] WANG D M, ZHANG C, DU Y Q, et al. Implementation of a cloud-based cell-free distributed massive MIMO system[J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(8): 61-67. DOI: 10.1109/mcom.001.2000106
- [5] 智能超表面技术联盟(RISTA). 智能超表面技术白皮书[R]. 2023
- [6] ZHANG L, CHEN MING ZHENG, TANG W K, et al. A wireless communication

- scheme based on space- and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces[J]. Nature electronics, 2021, 4(3): 218-227. DOI: 10.1038/s41928-021-00554-4
- [7] IMT-2030(6G)推进组. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021
- [8] 杨航,郑史烈,张红旗,等. 太赫兹轨道角动量通信关键技术与挑战[J]. 移动通信, 2023, 47(5): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230322-0002
- [9] 张超,王元赫. 论涡旋电磁波轨道角动量传输新维度[J]. 通信学报, 2022, 43(6): 211-222. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022087
- [10] WANG Y H, ZHANG C. Enhanced Shannon capacity with orbital angular momentum dimension [C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/iccworkshops53468.2022.9814548
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.03.050
- [12] GSMA Intelligence. Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile [EB/OL]. [2023-10-13]. <https://data.gsmainelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=60621137&file=300621-Going-Green-efficiency-mobile.pdf>
- [13] 陈艺. 宽带高回退 Doherty-Outphasing 功放的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020
- [14] 孙善球, 林学进, 王昊, 等. “双碳战略”给移动通信天线产业带来的机遇和挑战[J]. 移动通信, 2022, 46(3): 99-102. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.03.017

作者简介



李福昌, 中国联通研究院教授级高级工程师; 主要从事移动通信及固网移动融合等标准制定、测试验证、课题研究等工作; 发表论文100余篇。



郭希蕊, 中国联通研究院高级工程师; 主要从事无线通信研究相关的工作; 发表论文10余篇。