



面向“双碳”目标的未来绿色移动通信技术

李建东^{1,3}, 张夏雨^{1*}, 刘俊宇^{1*}, 赵晨曦¹, 盛敏¹, 朱江²

1. 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 西安 710071

2. 华为技术有限公司, 上海 201206

3. 鹏城实验室, 深圳 518055

* 通信作者. E-mail: 22011110207@stu.xidian.edu.cn, junyulu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2023-10-06; 修回日期: 2023-12-01; 接受日期: 2024-01-18; 网络出版日期: 2024-04-09

国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB2902300)、国家自然科学基金 (批准号: 62121001, 62341111, 62171344)、陕西省重点产业创新链项目 (批准号: 2022ZDLGY05-01, 2022ZDLGY05-06) 和鹏城实验室重点项目 (批准号: PCL2021A15) 资助

摘要 由我国首次提出的“双碳”目标(即“碳达峰”与“碳中和”),是“十四五”规划中的重要布局,也是未来移动通信网络实现绿色、可持续发展的关键目标,更是奠定我国国际碳资产定价权与世界碳交易平台的基础.其中,实现绿色通信的难点在于保持业务量增长的同时,降低网络能耗及碳排放.本文从移动通信网络侧节能减排的角度和通信网与多能能源网融合架构的角度对绿色通信技术展开研究.研究表明,实现绿色通信技术的关键在于进行网络资源、能量资源与业务分布的相互匹配,而现有技术仅能实现网络资源与业务分布的单向匹配,或能量资源与业务分布的单向匹配.基于此,本文提出一种通信、感知和能量融合的原生绿色网络架构,该架构具备能量感知与业务感知能力,支持网络资源、能量资源与业务分布双向匹配方法,通过消除业务分布与能量分布的随机性与突发性,实现业务量持续增长的同时,显著降低移动通信网络侧耗能及碳排放.

关键词 “双碳”, 绿色通信, 双网融合, 绿色网络架构, 节能减排

1 引言

为应对日益严峻的气候问题并迎接全球范围内的第三次能源革命,我国作为世界上最大的发展中国家,率先提出“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标.在移动通信网络的长期演进过程中,始终伴随着绿色通信的愿景.如何在网络总能耗与碳排放量大幅度下降的同时保障用户端个性化服务质量成为未来移动通信网络面临的挑战之一.然而,现有移动通信网络存在高能效、高浪费和高碳排并存的问题,因此需要从通信网与能源网融合的角度研究未来绿色移动通信技术.

引用格式: 李建东, 张夏雨, 刘俊宇, 等. 面向“双碳”目标的未来绿色移动通信技术. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 721-744, doi: 10.1360/SSI-2023-0287

Li J D, Zhang X Y, Liu J Y, et al. Overview of future green mobile communication technologies oriented to the “carbon peaking” and “carbon neutrality” target (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 721-744, doi: 10.1360/SSI-2023-0287

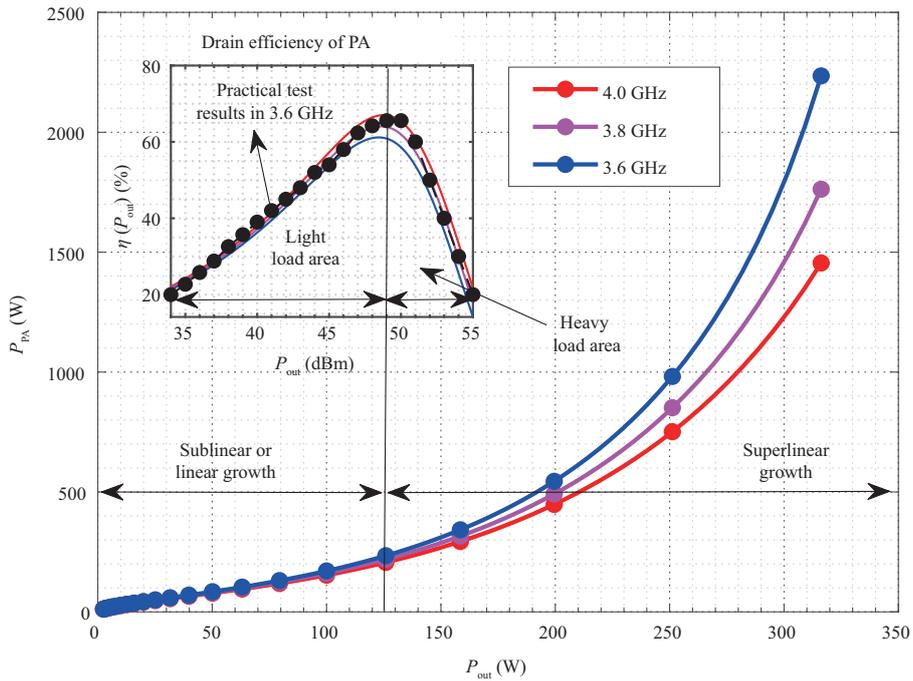


图 1 (网络版彩图) 放大器非线性曲线
 Figure 1 (Color online) Nonlinear mapping of power amplifier

1.1 未来移动通信网络的机遇与挑战

未来移动通信网络将满足不同服务差异化的性能需求, 在第五代移动通信网络 (5th generation wireless communication networks, 5G) 三类业务场景, 即大规模机器类通信业务、高可靠低时延业务以及移动宽带类业务的基础上, 国际移动通信 (International Mobile Telecommunications, IMT) 推进组提出第六代移动通信网络 (6th generation wireless communication networks, 6G) 的六类业务场景, 包括沉浸式通信类业务、超大规模通信类业务、泛在连接类业务、极高可靠低时延类业务、通信感知一体化业务以及人工智能 (artificial intelligence, AI) - 通信一体化业务^[1]. 未来网络极致的性能看似为全人类带来了无限的可能, 然而在“可持续发展”的时代趋势下, 依然面临着困难与挑战. 据中国联通预测, 在 2020~2030 年, 国内运营商基站数量将增长 9.6 倍, 能耗与碳排放增长 8 倍以上, 累计增加碳排放 5.9 亿吨, 这与“可持续发展”的理念背道而驰. 为了在未来实现碳达峰的目标, 彼时移动通信网络的碳排放量应当与目前碳排放量保持一致, 换言之, 未来移动通信网络需要在有限的能量约束下, 提供近百倍的流量, 从而实现能量效率 10~100 倍的提升. 除了面临高性能、高指标的难题外, 未来移动通信网络还面临着碳排放量随业务量增长发生超线性增长的难题, 特别是在超高数据密度类业务场景下, 网络所承载的业务量在空间域与时间域内发生随机变化, 受到基站各模块非线性效应的影响, 不可避免地导致额外耗能与额外碳排的产生. 其中, 基站射频放大器的输入功耗与输出功耗之间的非线性映射是造成高碳排与高频能耗的主要因素之一, 如图 1 所示. 因此, 理清碳排放、网络承载能力和业务分布之间关系的认知模糊问题, 是未来移动通信网络所面临的重要科学问题之一. 在该问题的驱动下, 国内外研究机构相继开展绿色通信技术的研究.

表1 面向“双碳”目标的国内通信行业研究现状

Table 1 Current research on “carbon-peaking and carbon-neutrality” target in Chinese communications industry

设备商/运营商/研究机构	研究报告/白皮书	节能减排理念与方案
华为	绿色发展 2030 ^[2]	极简架构: 通过基础网、云网和算网的极简架构实现网络低碳; 光电混合: 光电技术融合将带来通信网络设备架构及能效的深刻变化.
中兴	绿色 5G 核心网白皮书 ^[3]	“4+3+2” 架构新模式, 一方面实现绿色 5G 核心网降低运营商网络基础设施能耗, 另一方面充当绿色赋能者, 在满足行业用户绿色转型需求的基础上, 助力国家达成“碳达峰”和“碳中和”目标.
中国移动	中国移动碳达峰碳中和行动计划白皮书 ^[4]	构建“三能六绿”绿色发展新模式, 其中, “三能”指节能、洁能与赋能, “六绿”指绿色网络、绿色用能、绿色供应链、绿色办公、绿色赋能和绿色文化.
中国联通	中国联通 5G 智能节能技术白皮书 ^[5]	“3+5+1+1” 行动计划, 旨在通过建立碳管理体系, 围绕绿色发展方向, 推进基础设施共建共享, 赋能各行各业节能降碳.
中国电信	中国电信碳达峰行动白皮书 ^[6]	“1248” 双碳行动计划, 将绿色低碳理念融入网络规划、建设和运营全流程, 聚焦低碳、零碳和负碳技术, 全面实现绿色低碳发展.
IMT-2030(6G) 推进组	6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 ^[7]	环境可持续发展驱动力: 降低碳排放、推动“碳中和”要求提升能效, 实现绿色发展.
5G 演进学术交流论坛	面向 5G-A/6G 无线通信系统节能减排关键技术愿景白皮书 ^[8]	建立完善的无线通信系统能效评估标准和体系, 发展链路级、站点级和网络级节能技术, 使能其他行业节能减排.

1.2 绿色通信技术的国内外研究现状与结论

为了积极响应国家“双碳”目标的实施,我国通信设备商和运营商相继从通信系统的不同层面提出了相应的节能减排理念与方案,见表1^[2~8].中国移动、中国电信和中国联通发布了各自的面向“双碳”目标的白皮书和行动计划,并期望通过优化部署通信网络与通信设施达到节约电力和降低碳排的效果.华为、中兴等通信设备商从系统和架构的角度,提出了面向低能耗的新型网络架构,并充分利用AI使能技术,降低核心网与接入网侧耗能.学术界从理论层面提出绿色通信技术的发展方向,并预测了相关的指标,如IMT-2030推进组提出下一代移动通信网络的能量效率应达到现在的10~100倍.与此同时,国外学术界和工业界对绿色通信技术的研究逐步开展,见表2^[9~14].美国电信行业解决方案联盟(The Alliance for Telecommunications Industry Solutions, ATIS)和欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)将绿色可持续发展作为下一代通信网络要实现的目标之一.欧洲的6G旗舰项目Heta-x认为“可持续发展”是6G网络的三大基石之一,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)在“IMT towards 2030 and beyond”中规划了绿色通信的应用场景.

上述调研结果表明,可持续发展将是未来移动通信网络演进的必由之路,对绿色通信技术的研究不仅影响着下一代移动通信网络的演进,更关乎着全人类命运共同体的发展趋势.本文通过调研,探究移动通信系统节能减排的能力边界,即未来移动通信网络能否在保障用户差异化服务质量需求的同时,将能耗降低50%,碳排降低50%^[8].文章的后续内容组织如下.第2节阐述了面向“双碳”目标绿色通信技术的低碳演进方向,包括网络结构弹性化、传输单元精简化、网络资源多样化以及通信能源一体化.第3节从组网技术、传输技术和资源管控技术3个角度调研了现有移动通信网络中的绿色通信技术,调研结论表明,现有绿色通信技术可以将能耗降低50%以上,但是无法在同等、有限的能量约束下,将碳排降低50%.第4节在移动通信网络的基础上,引入能源网,对通信网与能源网联动下的低碳排技术开展研究,通过几种不同架构的对比,证实了双网融合架构对于碳排降低50%的可行性.

表 2 面向“可持续发展目标”的国外通信行业研究现状
Table 2 Current research on the “sustainable development” target in foreign communications industry

运营商/设备商/研究机构	研究报告/白皮书	节能减排理念与方案
ATIS	Green G: the path toward sustainable 6G ^[9]	下一代网络 Green G, 可持续性 (sustainability) 是其六大目标之一: 从根本上改变用电力支持下一代通信和计算机网络的方式, 同时加强信息技术在保护环境方面的作用。
Hexa-X	Designing the 6G networks of the future ^[10]	可持续性 6G 三大基石之一, 目标为优化数字基础设施, 实现节能降耗, 有效减少温室气体排放, 为行业、社会和决策者提供高效且可持续的数字化工具。6G 用户和应用将呈现泛在智能、泛在计算、沉浸式多媒体和多感官通信、数字孪生和扩展世界、智能工业、数字医疗与健康、泛在连接、感知和通信的融合、可持续性等 9 大趋势。
ITU	IMT towards 2030 and beyond ^[11]	通过绿色技术碳减排是降低通信行业对生态影响的关键。网络本身的能源消耗应尽可能得到管理和减少。通过先进的 F5G 技术, 在通信系统和数据中心过渡到更高效的 F5G 高级光网络, 可直接提高能源效率。
ETSI	The fifth generation fixed network: bringing fibre to everywhere and everything ^[12]	将 AI 技术与 5G 结合, 混合 AI 灵活分配负载, 5G 提供高效连接。用混合式 AI 架构, 将终端与云端的资源、能耗以及算力进行最优分配。
Qualcomm	The future AI is hybrid ^[13]	最大限度地减少 ICT 行业的环境足迹, 同时最大限度地发挥当前和未来移动网络的积极作用。从能源效率到可持续转型: 通过有效的数字化影响社会并减少环境足迹的高资源效率网络。
Ericsson	6G spectrum: enabling the future mobile life beyond ^[14]	

第 5 节展望了未来的工作与挑战, 第 6 节总结全文。

2 移动通信网络的低碳演进

在移动通信网络的布设初期, 为了尽可能地提升网络信号的覆盖率, 运营商采取部署覆盖形状为正六边形的大功率基站策略, 形成结构规则、密度均匀的同构蜂窝网络; 随着移动通信网络的进一步发展, 由单一宏蜂窝基站构成的单层网络难以再满足用户业务的多样化与差异化需求, 宏蜂窝覆盖, 微蜂窝补盲, 成为了一种提升网络服务能力的行之有效的部署方式; 为了进一步实现网络的深度覆盖, 运营商采取密集化部署微基站的方式提升网络覆盖能力, 单位面积内的基站数与天线数激增, 在提升网络服务能力的同时, 带来了碳排与能耗的爆发式增长。面向“双碳”目标, 移动通信网络正朝着低能耗、高能效和低碳排的方向演进, 具体表现为以下 4 个方面:

网络结构弹性化, 网络密集化是提升网络容量的最直接、有效的途径之一, 可是网络密集化并不总能带来网络性能的提升, 一方面, 超密集网络下蜂窝间的复杂干扰将恶化网络性能, 另一方面基站密度的增长会同步带来碳排的增长。显然, 致密、无缝的覆盖并不是低能耗的覆盖方式, 考虑到网络中业务流量分布的随机性, 通过组网架构的弹性变化, 进行网络结构与业务分布的相互匹配, 实现按需覆盖是一种高能效的、低碳排的覆盖方案。

传输单元精简化, 随着流媒体业务的增长, 单位面积内的终端连接数与业务量激增, 基站射频模块收发端天线数增加, 由传统的单天线结构, 逐步演进至多输入多输出 (multiple-in and multiple-out, MIMO) 的结构, 再演进至超大规模阵列天线结构。可是由于射频端器件的非线性效应, 超大规模天线阵列会导致高能效与高能耗并存的问题, 而传输单元稀疏化是降低碳排的有效途径, 在轻业务负载下, 通过天线/符号/载波周期性地休眠与关断, 可以在保持基站服务能力的同时降低功耗。

网络资源多样化,在宏蜂窝基站与微蜂窝基站所组成的双层异构网络中,层间干扰严重制约了网络的能量效率,如何对通信资源进行高效管控,消除跨层干扰,提升网络能效,成为移动通信网络向低碳发展的演进方向之一;在移动通信网络中,除了载波、带宽、符号和时频资源块等无线资源,电力、光伏等能量资源,还包括网络基础设施、虚拟化功能实体等物理资源,以及由虚拟化功能实体组成的切片资源.对上述资源进行合理、高效的管控,实现网络资源与业务分布的匹配,可以有效降低网络耗能,降低碳排.

通信能源一体化,为满足未来移动通信网络提升 10~100 倍能效的需求并同时实现碳中和的目标,意味着要在有限的碳排或能量约束下保障用户服务质量.将移动通信网络与绿色能源网融合成为实现上述目标的可行方案,绿色能源网可收集太阳能、风能、潮汐能等清洁能源,与传统电网不同之处在于绿色能源网不会产生碳排,且清洁能源的电价要低于传统电网的电价.因此移动通信网络与绿色能源网络融合架构将成为实现低碳排乃至零碳排目标的必然选择.

综上所述,面向“双碳”目标,移动通信网络一方面朝着低能耗的方向演进,通过组网技术、传输技术和资源管控技术降低网络侧耗能;另一方面朝着通信网与能源网融合的方向演进,通过能量资源的按需调度、共享与交易减少碳排.基于此,本文分别对移动通信网络中的低能耗技术(第3节)和移动通信网络与能源网融合架构下的低碳排技术(第4节)开展调研.

3 面向低碳的组网传输技术

作为能量的消耗侧,减少移动通信网络耗能是降低碳排、提升网络能效最直接的手段.本节结合移动通信网络的低碳演进方向,主要从组网技术、传输技术和资源管控技术3个方面对移动通信网络中的节能技术开展研究.

3.1 组网技术

网络结构决定着网络的覆盖能力,从早期的信号覆盖、容量覆盖到现在的深度覆盖、广域覆盖,以及面向未来移动通信网络的全球、无缝覆盖,网络结构从同构转变为异构,从二维平面覆盖转变为三维立体覆盖,从均匀、规则的六边形蜂窝结构,转变为密集、无序的泰森多边形结构.面向“双碳”目标,移动通信网络结构要实现低碳排、可持续、高能效的、与业务分布相匹配的按需覆盖.本节将回顾 4G 长期演进(long term evolution, LTE)和 5G 新空口(new radio, NR)中几种高能效的网络覆盖结构,并就其节能机理进行叙述,参见表 3^[15~23].

3.1.1 集中式 RAN 结构

集中式/“云”无线接入网(centralized/cloud-radio access network, C-RAN)是文献[15]中提出的一种接入网结构,如图2所示. C-RAN 结构由基带单元(baseband unit, BBU)和与前者分隔布设的射频单元(remote radio head, RRH)组成.其中,一定数量的 BBU 被集中部署,形成 BBU 池.在 C-RAN 中,虚拟化 BBU 池可以对基带处理资源进行统一管理和动态分配,即能够适应非均匀业务并提升资源利用率,并通过基带处理单元之间的相互协作,来优化网络性能、降低运营成本^[16].

相比于 4G C-RAN, 5G C-RAN 在延续了集中化、协作化、云化和绿色等主要特征的同时,在 4G C-RAN 的基础上产生了一些技术上的演进. 5G C-RAN 将基带处理单元分割为集中单元(central unit, CU)和分布单元(distributed unit, DU),并提出逻辑上两级集中的概念.第一级集中可引入协同多点(coordinated multiple points transmission, CoMP)、分布式多输入输出(distributed multiple-in and

表 3 接入网结构对比
Table 3 Comparison of access network structures

覆盖结构类型	主要特征	缺点/需要克服的难题
C-RAN [15~17]	(1) 基带处理单元和射频单元采取分隔布设的方式, 基带处理单元被集中放置在 BBU 池内, 通过基站之间的协同操作提高资源利用效率; (2) 5G C-RAN 将基带处理单元分割为 CU 和 DU 两个功能实体, 并采用 NFV 和 NGFI 结构, 实现灵活部署功能单元, 提高资源复用率.	NGFI 结构既支持完全的集中化部署, 也支持分布式的 DU 部署. 其中, 完全的集中化部署难以通过联合收发为边界用户提供服务, 边界处可能出现有信号无服务的现象; 而分布式 DU 部署产生的运营成本较大.
超蜂窝 [18, 19]	(1) 通过控制覆盖和业务覆盖适度分离, 实现柔性覆盖; (2) 资源与能量分布弹性匹配; (3) 基于不同类型的业务和用户需求, 进行按需、适度服务.	用以提高能效的柔性覆盖、弹性接入以及适度服务的机制均会带来额外延时, 降低用户体验. 如何平衡网络能效和业务延时成为一大挑战.
Cell-Free 覆盖结构 [20~22]	(1) 每个用户同时由多个接入点组成的接入点簇服务. 因用户靠近接入点, 而提高了覆盖率; (2) 接入点通过时分双工服务用户, 没有小区边界; (3) 上行链路和下行链路采用共轭波束成形/匹配滤波技术, 提升了系统的吞吐量; (4) 采用最大/最小功率控制算法, 保证为整个覆盖范围提供相同、优质的服务.	实现的复杂度较高, 相比于小蜂窝系统, 无蜂窝大规模 MIMO 系统需要更多的回程.
资源小区 [23]	(1) 按需覆盖的能量覆盖模式: 通过分析业务分布的空时演变规律, 周期性地调整网络拓扑; (2) 与覆盖结构匹配的网元关断/激活策略: 小区内接入点可根据网络拓扑进行 CU/DU 网元的关断与激活; (3) 以用户为中心的载波休眠与传输机制: CU 网元为每个接入点严格分配可用的正交载波, 同时周期性地不同载波的激活与休眠, 避免相邻小区间的同频干扰.	资源小区覆盖结构中传链路的分钟级调整虽然可以实现覆盖与业务的精准匹配, 但难以满足信道状态的微秒级变化, 且资源编排可能会带来时延影响.

multiple-out, D-MIMO) 等技术, 以提升小区边缘频谱效率和小区的平均吞吐量, 克服了 4G C-RAN 中不同资源池之间的基站不能通过联合收发为边界用户提供服务, 而带来“有信号无服务”的问题. 同时, 采用下一代前传接口 (next generation forward interface, NGFI) 与网络虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 架构, 能最大程度地实现资源的复用共享, 并进行功能的灵活部署, 应对业务随着时间动态变化的“潮汐现象”. 因其无线云化、集中部署、共同协作的特点, 5G C-RAN 减少了对无线机房的依赖, 降低了机房的建设成本和整体的功耗, 减少了碳排放量, 实现了绿色高效通信. 此外, 还可将 C-RAN 结构与 AI 算法结合, 通过业务分布与资源分布的匹配来进一步节能. 文献 [17] 通过设计一个基于马尔可夫 (Markov) 计算模型的 C-RAN 结构, 制定了动态 RRU 流量负载下的 BBU 活动/睡眠状态转换方案, 实现了在动态业务负载下的节能; 文献 [24] 提出了半静态和自适应的 BBU-RRH 切换方案, 与传统小区部署相比, 半静态和自适应方案的 BBU 数量可以分别减少 26% 和 47% [17]. 两种方法都实现了业务分布与覆盖结构的相互适配, 从而有效降低了系统能耗.

3.1.2 超蜂窝覆盖结构

为了使小区覆盖更适应业务结构, 使得业务服务按需提供, 实现柔性覆盖, 可采用部分控制信令功能与数据功能解耦的超蜂窝网络架构 [18], 如图 3 所示.

超蜂窝是一种资源与能效共同优化的网络架构, 与传统业务与信令耦合的蜂窝网络不同, 最早被提出于文献 [19]. 超蜂窝网络结构的主要特征是采用控制覆盖和业务覆盖适度分离的方式, 在低负载的情况下, 只使用少量能量去维持控制覆盖, 而业务覆盖可根据实际的业务需求动态分配, 从而实现柔性覆盖 [19]. 基于此, 超蜂窝可根据实际需求开启或关闭基站, 更灵活地支撑基站休眠技术, 解决了

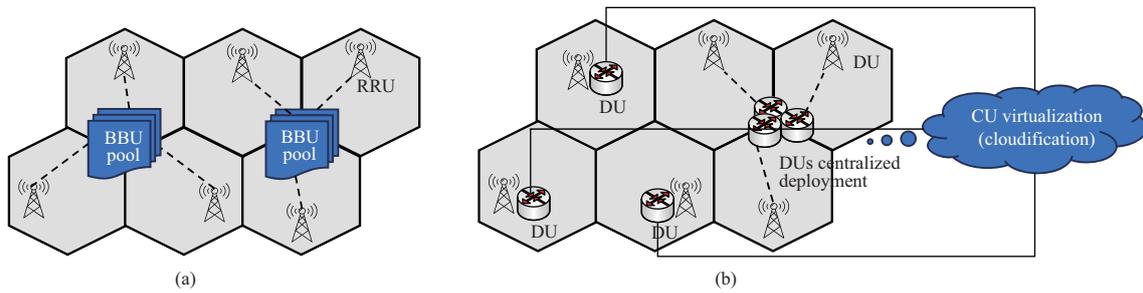


图 2 (网络版彩图) C-RAN 覆盖结构
 Figure 2 (Color online) C-RAN coverage structure. (a) 4G C-RAN; (b) 5G C-RAN

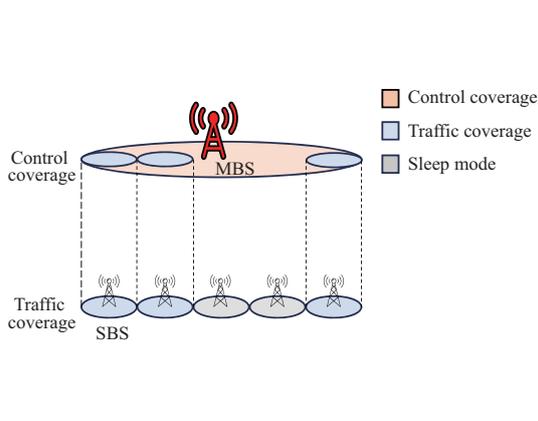


图 3 (网络版彩图) 超蜂窝覆盖结构
 Figure 3 (Color online) Hyper-cellular coverage structure

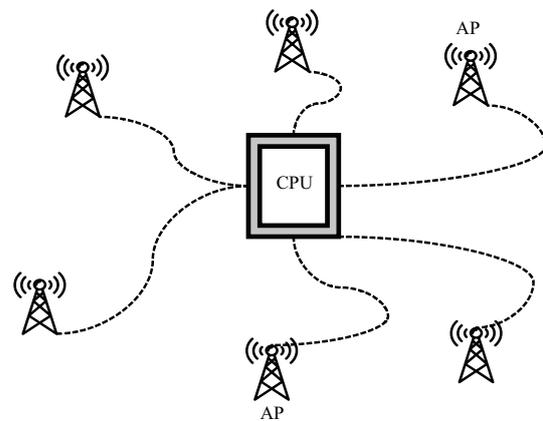


图 4 (网络版彩图) 无蜂窝覆盖结构
 Figure 4 (Color online) Cell-free coverage structure

传统蜂窝网络因引入基站休眠而产生的控制信令覆盖空洞的问题^[19]. 且通过联合优化业务基站休眠和频谱分配, 超蜂窝在典型场景下可节省 50% 的网络能耗^[18]. 文献 [25] 研究了超蜂窝网络中突发业务到达模型下的业务基站休眠问题, 定量分析了业务基站休眠机制对业务延时带来的影响, 在延时约束下设计了最优的基站休眠方案, 并充分考虑了业务突发性对系统能效的影响, 进一步优化系统、降低功耗. 将业务流与资源流高效匹配, 实现低能耗的绿色通信. 此外, 文献 [18] 提出软件定义的超蜂窝网络架构, 软件定义的超蜂窝架构包含两部分, 即虚拟化的基础设施和软件定义的服务, 可通过调整虚拟基站池的规模, 在计算增益与前传成本间取得良好平衡, 为用户的动态业务提供绿色弹性服务.

3.1.3 无蜂窝覆盖结构

无蜂窝网络结构是符合绿色通信趋势的新型网络结构^[26], 因没有传统蜂窝结构的小区边缘而被称为“无蜂窝”, 如图 4 所示. 该架构以用户为中心, 由大量接入点 (access point, AP) 和中央处理单元 (centralized processing unit, CPU) 组成. 无蜂窝网络中的每个用户由多个特定接入点组成的接入点簇服务^[21, 22]. 接入点通过时分双工 (time division duplexing, TDD) 模式在相同的时频资源上联合服务用户. 因所选接入点距离用户很近, 路径损耗较小, 所以能够在满足用户通信质量需求的前提下降低射频段发射功率, 从而提升系统能效. 然而, 无蜂窝网络结构能量资源可能会存在被低效利用的现象. 例如在低流量负载期间, 若无蜂窝网络中的所有接入点都保持开启状态, 资源的利用与业务需求量不匹配, 会产生能量浪费的现象.

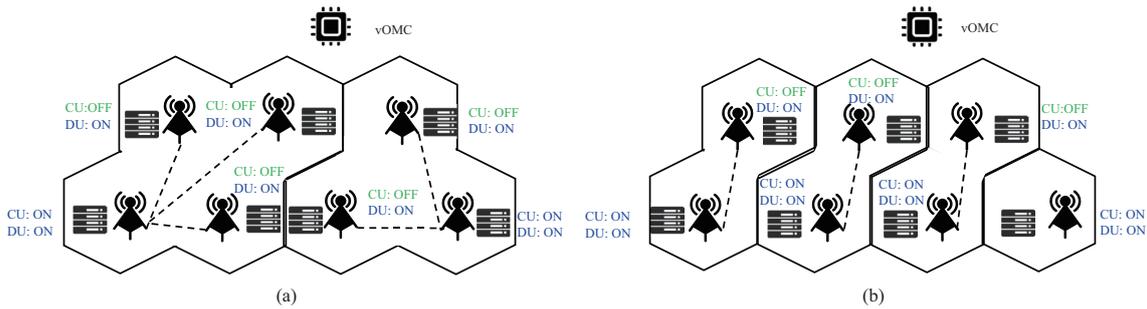


图 5 (网络版彩图) 资源小区覆盖结构
Figure 5 (Color online) Resource cell coverage structure

为了构建绿色通信网络, 在未来, 无蜂窝大规模 MIMO 网络会朝着智能化的方向发展, 与人工智能算法相结合, 进一步提升能效、减少碳排。具体地, 文献 [27] 提出了一种根据网络中活跃移动台的数量和位置动态地开/关部分接入点的策略, 通过平衡可用网络状态信息和硬件配置 (即接入点数量、每个接入点的发射天线数量和移动台数量), 实现了资源流与业务流的匹配。类似地, 文献 [28] 研究了时变信道环境中接入点 AP 的睡眠节能机制, 将 AP 开关切换策略类比一个马尔可夫决策过程, 通过深度强化学习算法来动态调整 AP 开关问题, 以适应用户业务需求量, 实现高效通信。

3.1.4 资源小区覆盖结构

为了使网络结构能够及时适变网络中业务的空时分布, 同时满足超高数据密度业务场景下的高能效、按需覆盖, 文献 [23] 提出资源小区覆盖结构。资源小区在 5G C-RAN 结构的基础上演进得到, 沿用了 5G NR 集中单元、分布单元与有源天线单元 (activated antenna unit, AAU) 三级分离的结构, 采用数据面与控制面解耦的面向服务的架构 (service based architecture, SBA), 支持弹性组网与多点协作传输。接入网侧的虚拟操作和管理中心 (virtual operation and maintenance center, vOMC) 可根据资源小区上报的网络状态信息, 如, 信道状态、业务分布、基站激活/休眠状态等, 生成网络拓扑, 管理编排网络结构, 向资源小区分发 CU-DU 映射表, 指导覆盖结构调整, 针对业务的动态变化实现信号的无缝覆盖与容量的按需覆盖, 匹配覆盖结构与业务分布, 如图 5 所示。资源小区的节能机理有如下三点。

(1) 低能耗的能量覆盖模式: 与容量覆盖模式不同, 能量覆盖是在有限的能量约束或碳排约束下, 针对超密集网络中业务变化的“潮汐”现象, 资源小区通过分析业务分布的空时演变规律, 周期性地调整网络拓扑, 重构覆盖结构。例如, 在移动终端业务量需求大的区域, 网络以用户簇为中心, 将信道相关性强的相邻接入点簇化, 形成资源小区, 小区内接入点为簇内用户协作传输信号, 增强用户端有用信号增益, 从而提升其信干噪比; 在移动终端业务量需求小甚至为零的区域, 资源小区采取不同层级的休眠, 包括网络级、站点级、网元级和载波级, 休眠的策略由资源小区内集中单元执行, 集中单元保障全局范围内网络信号的无缝覆盖, 以便于控制信号的传输。

(2) 与覆盖结构匹配的网元关断/激活策略: 得益于 5G NR AAU-DU-CU 分离结构, 在形成资源小区后, 小区内接入点可根据网络拓扑进行 CU/DU 网元的关断与激活。其中, 一个资源小区只激活一个接入点的 CU 网元, 剩余接入点只激活 DU 网元并同时将其 CU 网元功能关断。激活的 CU 网元负责资源小区内全部接入点的 CU 功能, 并通过中传链路与 DU 进行信息交互。资源小区一方面通过大量关断接入点 CU 网元实现节能, 另一方面激活的 CU 网元可以集中式执行资源小区内 AAU 发射功率的控制并执行无线资源的分配, 从而实现能量的高效利用。

(3) 以用户为中心的载波休眠与传输机制: 在 3GPP 定义的 5G NR 传输技术中, 超大规模多输入

多输出 (massive multiple-in and multiple-out, Massive-MIMO) 技术支持波束定向发射, 接入点可为用户分配正交的载波波束, 增强覆盖能力. 在资源小区中, 为了保持簇内用户使用载波的正交性, 避免同频传输产生干扰, CU 网元为每个接入点严格分配可用的正交载波, 同时周期性地不同载波的激活与休眠, 避免相邻小区间的同频干扰. 在该机制下, 资源小区至少能够降低射频端 50% 的发射功率.

为克服射频端输入输出功率非线性导致的高能耗与高碳排问题, 资源小区支持如下 3 种节能技术:

(1) 弹性组网技术: 针对多样化的业务需求, 资源小区可通过弹性组网动态调整覆盖结构. 对于超高数据密度流量场景, 多个小区被合并, 使得接入点之间能够协作传输, 以增强覆盖能力, 同时降低接入点的平均能耗. 对于大规模连接场景, 资源小区被拆分, 并以能量覆盖模式为用户提供服务.

(2) 动态休眠技术: 为了减少基站空闲期间的额外能耗, 资源小区支持各种级别的休眠. 对于低流量需求和低流量密度的区域, 资源小区支持载波级、设备级、站点级和小区级休眠, 通过主动生成覆盖空洞, 实现按需覆盖.

(3) PA 电压调节技术: 射频单元的能耗主要取决于偏置电压, 偏置电压与 BS 负载正相关. 因此, 在通过弹性组网生成资源小区之后, 资源小区内的接入点选择性地与用户设备相关联. 通过保持射频单元工作在线性区, 可以降低偏置电压, 从而显著降低射频能耗.

3.2 基于关断设计的传输技术

据统计, 基站约 65% 的能耗由射频单元在放大传输信号的过程中产生, 而引发射频单元高能耗的根本原因在于射频器件的非线性. 因此, 采用精简的波束设计, 保持射频器件工作在线性区, 是降低器件功耗的有效途径. 与深度休眠不同, 精简的波束设计是微秒到秒级的短周期、浅层休眠, 使基站能够根据业务的变化, 稀疏地传输控制信号, 可以保障在基站时空尺度上连续覆盖的同时降低基站耗能. 具体包括空间域 (天线关断)、时间域 (符号关断) 和频率域 (载波关断) 3 种维度.

3.2.1 空间域设计 – 天线关断

与 4G 基站相比, 5G 基站通道数目显著增多, 为达到与业务负载匹配的目的, 可在业务需求少的情况下考虑多天线的通道关断, 从而减少碳排、节省能量. 与符号关断相比, 通道关断在保证服务连续性上更具优势^[29]. 通道关断是指通过判断相应小区的物理资源块 (physical resource block, PRB) 利用率、无线资源控制 (radio resource control, RRC) 连接用户数、语音用户数等负荷状态, 动态决策开/关通道来节省能耗, 在低负载的情况下, 允许关闭本小区的部分天线通道. 为了保证通道关断后的控制信道覆盖和业务不受影响、用户体验感不被降低, 针对通道关断后总发射功率和天线增益下降的问题, 可采取合理增加剩余信道的发射功率的方法. 直至检测到用户业务需求增加后, 再恢复原有的通道数和通道发射状态. 天线的关断操作与业务需求相匹配, 有效应对了业务在时间上分布不均的“潮汐现象”.

3.2.2 时间域设计 – 符号关断

符号关断最先在 4G LTE 系统中被提出. 为节省功率开销, 对于中轻载情况, 可以在无业务时进行符号关断, 调度程序可根据系统负载和服务数据预测为下行数据分配一定数量的符号, 并在没有信息传输时关闭功率放大器 (power amplifier, PA). 尤其, 可以关闭没有小区参考信号 (cell reference signal, CRS)、同步信号 (synchronization signal, SS) 或广播信息的符号. 将符号关断与业务流量进行匹配, 可根据业务的繁忙程度和业务数据量预测, 在无有效信息传输的符号时间关闭 PA 功放, 或将少量的用

户数据调度集中在几个时隙中传输, 关闭剩余无用户数据传输的时隙的功放, 使得在更大的时间范围内可以获得符号关断的节能收益, 以降低系统能耗. 符号关断节能的本质是降低功放的静态功耗. 如果关断 X 个符号, 则功放和收发单元的静态功耗可减少 $X/14$ [29].

3.2.3 频率域设计 – 载波关断

载波关断是指在流量负荷极低、流量分布不规则的情况下, 关闭部分载波实现共同覆盖, 适用于多频或多模网络场景. 载波关断具体可以分为制式内载波关断 (LTE 制式内或者 NR 制式内) 和制式间载波关断 (4G/5G 协同载波关断). 将其中一层作为覆盖层, 另一层作为容量层. 在小区负荷低的情况下, 关断容量层, 保留覆盖层 [29]. 用户应在容量外层关闭前移交给基本覆盖小区, 流量负荷通常不超过物理资源块利用率的 10%.

3.3 资源管控技术

在移动通信网络中, 除了通过网络结构与业务分布匹配的手段降低能耗, 通过资源管控技术, 使不同维度的网络资源与业务分布相互匹配, 也是降低碳排的有效方法. 这里的网络资源包括通信资源, 如, 核心网功能实体和基站数据单元等网络资源, 算力、AI 模型等计算资源以及存储资源.

3.3.1 通信资源

网络切片是 5G 大规模工业物联网应用场景下的关键技术 [30], 可根据不同的业务类型对网络基础设施资源进行切片, 针对业务的需求按需提供网络资源, 如, 计算资源、通信资源和缓存资源. 面向“双碳”目标, 低碳、绿色的网络切片技术仍有待研究, 本文提出一种低碳网络切片架构, 如图 6 所示, 类似于典型网络切片架构, 该架构包括虚拟化网络基础设施 (network function virtualization infrastructure, NFVI)、低碳网络切片和网络切片管理编排体 (management and orchestration, MANO).

虚拟化网络基础设施由低碳网络架构的各类硬件资源虚拟化得到, 包括计算、通信、存储和感知等功能. 网络功能虚拟化能够使网络切片更加灵活、多样、可扩展. 通过对网络中各类资源虚拟化, 可以向低碳网络架构提供不同的虚拟网络功能, 虚拟网络功能之间相互连接, 形成一个完整的业务功能链, 为终端用户提供定制化服务.

在低碳网络架构中, 常见的功能包括碳排测量、能源调度与能量感知 [31], 与之相对应的切片包括碳排测量片、能源路由片和能量感知片. 碳排测量片用于网络对碳排的实时监控, 检测碳排异常区域, 识别碳排故障节点, 发现系统故障, 包括智能电表、碳排传感器等硬件资源的虚拟化功能; 能源路由片用于能源调度与传输, 为复杂的能源传输网络规划最佳的能源分配路线, 支持网络实时监控能源使用情况便于进行能源的按需分配, 包括变压器、配电箱等硬件资源的虚拟化功能; 能量感知片用于可再生能源的收集和存储状态的获取, 为能源路由功能提供数据支持, 使其具备能量分布的全局视角, 包括各类传感器、高级计量基础设施设备等硬件资源的虚拟化功能.

网络切片管理编排体负责管理虚拟化网络功能 [32], 一方面根据业务需求在切片中添加、删除或重新分配虚拟网络功能, 另一方面可以监控虚拟网络功能的状态, 进行网络切片的性能优化, 为低碳网络中的垂直用户提供多样化的网络服务. 此外, 边缘计算也可以增强低碳网络架构的切片能力, 边缘计算节点既可被 MANO 用于切片管理和优化, 指定 NFV 编排策略, 也可以直接在切片内使用, 为服务提供计算能力. 相比于集中式计算, 边缘计算与网络基础设施和用户终端更贴近, 可以减少传输造成的时延, 便于时延敏感性业务的应用, 如碳排测量和能量感知.

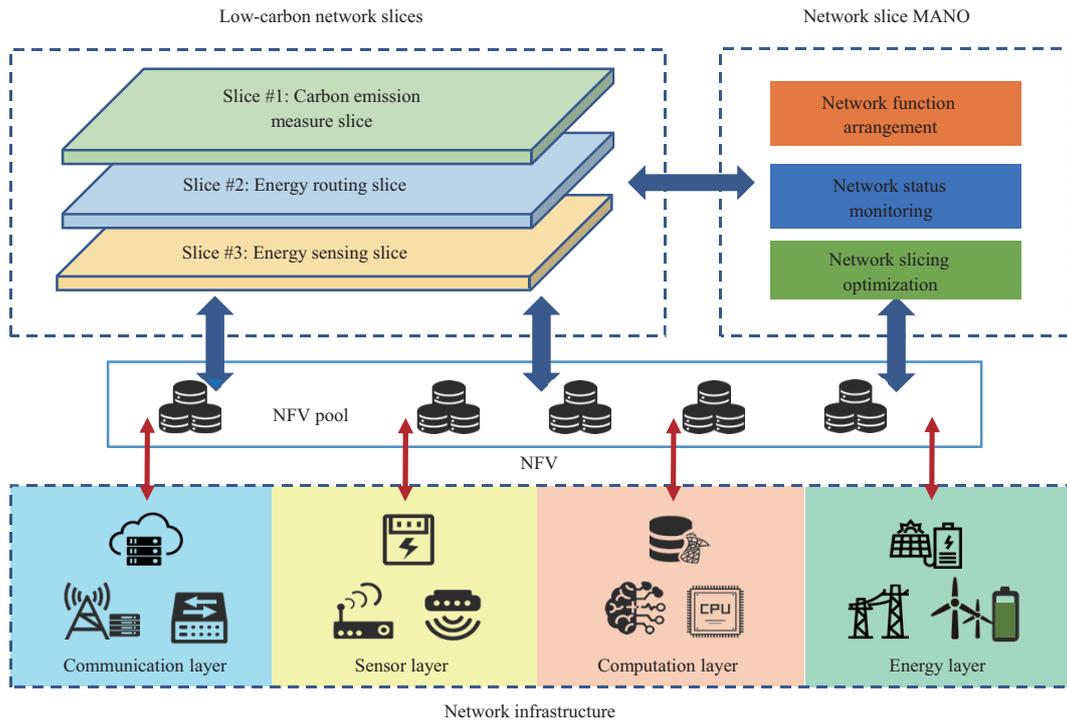


图 6 (网络版彩图) 低碳网络切片架构
Figure 6 (Color online) Low-carbon network slicing architecture

3.3.2 计算资源

下一代移动通信网络支持各类大速率、大容量、超密集业务,为了缓解网络侧能量开销,学术界已提出了大量基于迭代的计算方法,以提高系统能效、降低基站能耗.目前,人工智能技术已经被采用来简化数学迭代求解过程^[33,34],包括传统的启发式算法和流行的机器学习(machine learning, ML)方法,以降低算法复杂度,降低系统开销.在计算资源的管控方面,节能减排的研究主要集中在计算任务卸载与计算资源分配上^[35].

利用计算资源管控技术来降低系统能耗的具体表现为:深度强化学习算法(deep reinforcement learning, DRL)被应用在移动的边缘计算(mobile edge computing, MEC)中,将计算任务卸载到 MEC 服务器.通常数据卸载在通信中有较高的功率消耗,为管控计算资源以提高系统能效,文献[36]提出了一种新的混合卸载模型,利用有源 RF 通信和低功率反向散射通信的互补操作,平衡本地计算和数据卸载中的能量消耗,从而提升系统能效;与从零开始学习、需要大量复杂训练数据的传统机器学习算法不同,迁移学习算法能在已有的数据体系基础上进行微调或只训练部分数据体系,从而可以减少计算消耗和所需的训练数据.文献[37]降低计算资源开销,通过迁移学习进一步提高节能效果,可以减少所需的训练数据和计算资源,加快学习过程,从而扩展和加速应用;联邦学习(federated learning, FL)可根据当前状态有效地行动,利用空闲的边缘计算资源获得成果,边缘服务器可在本地保留训练数据,从而减少中央控制器的消耗.文献[38]利用分布式联合学习算法,令边缘设备处理初始计算,所需计算资源较少,并将繁重的计算任务卸载到分布式边缘服务器上,减轻了计算资源(这里指边缘设备和服务器之间的计算能力)的开销,最大限度地降低系统能耗.

上述研究通过发掘各类 AI 算法模型对计算资源、能量资源与通信资源的耦合关系,进行资源管

控, 从而降低计算开销, 提升系统能效, 实现绿色通信。

3.3.3 存储资源

为克服业务高峰时段数据传输拥堵、数据处理过慢、出现延迟的现象, 提高用户体验感。对于一些受用户关注度高的内容, 可以在网络节点处采用缓存技术。在高速缓存中, 频繁请求的数据项被存储在主内容服务器和用户设备之间的网络节点中^[39,40]。这些数据在内容请求到达之前被高速缓存, 并用于在高峰时段为用户提供服务。简单来说, 缓存主要通过数据存储单元来替代额外的带宽需求^[41]。这样不仅避免了重复传输, 减少了用户感知的延迟, 还能提高系统的频谱效率和网络吞吐量^[42]。然而, 使用高速缓存单元的过程需要消耗额外的能量。因此, 在保障用户体验的前提下还能降低能耗的绿色高速缓存技术受到广泛关注。文献^[43,44]根据网络流量需求来智能选择内容传输路径、激活高速缓存节点, 文献^[45]提出了一种基于内容缓存与提前推送的可再生能源有效利用机制, 其具体思路是: 当能量充足时, 在基站处主动缓存用户反复请求的内容, 或将已缓存的数据提前推送至用户端, 这样即使在基站能量不足且可再生能源供能不充分的情况下, 用户依然能够迅速流畅地获取内容, 提升用户体验感。这一思路使能量可以被“提前”使用, 以适配业务在时间上的不均匀分布^[46], 不仅减少了对电网能源的依赖, 还降低了碳排放量, 实现绿色通信。

4 面向低碳的通信网与能源网融合架构与管控技术

第3节从网络侧耗能的角度出发, 探讨了如何通过减少通信耗能降低碳排, 本节将从能量供给侧的角度, 研究如何经过能量的收集、存储与调度, 为移动通信网络按需提供能量, 同时研究在通信网络与能源网络融合架构下, 如何实现通信资源、能量资源与业务分布的双向匹配。

4.1 通信网与能源网融合架构

进入5G时代后, 随着对通信质量的需求日益增长, 蜂窝网络的大规模部署带来了巨大的能源消耗, 无线通信系统每年产生20亿吨左右的碳排放量^[47], 其中70%的碳排来自于基站^[48]。为了解决碳排放日益增长的问题, 绿色能源(如太阳能、风能、潮汐能、地热能等)的合理使用引起了全球范围内的广泛关注。绿色能源作为一种环境友好型能源, 产生的碳排放量为0, 为传统的电力供应系统注入了新的活力。但是, 由于绿色能源的收集具备波动性与随机性, 如何高效地利用绿色能源存在着困难和挑战。

由于绿色能源的引入, 能源网也变得复杂化与多样化, 在以下关于绿色能源的研究中, 虽然并未考虑通信资源、能量资源与业务分布之间的匹配, 但为能源网的资源管控技术方面做出了基础性与开创性的贡献。文献^[49]研究了一种完全依赖可再生能源的蜂窝接入网络, 结合基站的能耗模型和典型流量曲线来计算基站的能耗需求, 并针对部分指定位置, 根据太阳辐射功率和基站的日能量需求, 确定太阳能光伏板的尺寸, 完成了零电力蜂窝网络的仿真实现。文献^[50]相较于文献^[49]进一步采用电池储能技术, 使收集到的太阳能不被浪费, 通过详细分析太阳能光伏板和储能电池的技术参数, 确保了LTE宏基站的能源自治和长期能源平衡。文献^[49,50]仅依赖于统计负载信息, 并未对能源利用进行优化, 可能导致过度配置, 此外并未考虑基站互联、通信资源分配、用户服务质量(quality of service, QoS)要求等约束, 但仍证明了引入绿色能源的能源网在降低碳排放的可实现性与巨大潜力。文献^[51]研究了传统电网和绿色能源组合供电的多基站移动通信系统, 提出了一种非合作博弈模型, 用于探索可再生能源供应商和基站的能源分配策略, 降低通信系统的碳排放。文献^[49~51]均使用了绿能或绿

表 4 通信网与能源网融合架构研究

Table 4 Research on communication network and energy network integrated architecture

文章	框架	特点/研究
[53]	RE-CRAN 框架	将资源分离至控制平面、数据平面和能源平面中.
[54]	多层合作框架	多层部署, 每层由具有相似功率传输水平和覆盖需求的节点组成.
[55]	弹性资源利用框架	包含主动与被动两个组件, 前者预测需求, 后者根据需求做资源调度.
[56]	分层分布式资源管理框架	由无线电资源分配、干扰协调、能量共享 3 种策略组成.
[57]	-	在通信资源与能量关联的前提下, 研究合适的 RB 分配与功率分配策略降低能耗.
[58~60]	-	将通信资源与绿色能源供给进行协调, 优化通信资源分配以减少棕色能源使用.
[61, 62]	-	结合能量分布进行通信模式或用户关联策略的选择, 降低能耗.

能与传统电网结合的方式为网络实体供电, 较为显著地降低了网络能耗与碳排放, 可以说明绿色能源在能源网中起着至关重要的作用. 文献 [52] 为了应对能量资源分布的随机特性, 使用基于强化学习的开/关算法, 使能基站自主学习能量收集和能量需求模式. 不足的是, 该研究只在能量层面进行了降低网络碳排放相关的研究, 没有综合考虑通信资源分布与业务分布情况. 为此, 有必要提出能量资源与通信资源联合编排与调度的理念.

在绿色能源的引入下, 前人已经对通信网与能源网的融合做出了一些研究, 并提出了一些相关的融合框架, 如表 4^[53~62] 所示. 文献 [53] 将可再生能源纳入了 C-RAN, 提出了一种由可再生能源驱动的 RE-CRAN 结构. 该结构将通信、计算、能量资源进行了抽象和集中, 整合为控制平面、数据平面与能源平面, 实现了对通信资源和能量资源的联合管理与优化. 其中数据平面完成数据路由的管理、识别 QoS 要求与网络流量相关的随机特征, 能源平面 (由分布式可再生能源资源 DER、分布式能源存储设备 DESD 和能源路由器组成) 完成绿能的收集、存储、流动以及传统电网的使用, 控制平面全局管理网络资源与能量资源. 文献 [54] 提出了一种多层合作的绿色异构网络框架, 每层由具有相似传输功率水平和类似覆盖需求的节点组成, 支持集中式基带处理、协同无线电和异构网络节能, 该框架实现能量资源与通信资源的联合管控, 旨在平衡和优化异构无线网络中的频谱效率、能量效率和用户服务质量. 但由于设计框架的多层部署, 不同层的节点传输功率不同, 相互叠加, 产生了新的复杂干扰场景, 需要更复杂的干扰抑制技术. 文献 [55] 以 SDN 技术为核心, 提出了一种弹性资源利用框架, 其核心为通过预测用户流量从而进行能量资源的调度, 减少绿色能源的消耗, 其框架包含主动与被动的两个关键组件, 前者预测每个用户容量需求的波动, 并提前为虚拟基站 (virtual base station, VBS) 做出一定 (有限的) 时间范围内的规划; 后者监控虚拟机 (virtual machine, VM) 的利用情况, 并在预期资源利用率与实际观测之间存在不匹配时触发超配或欠配警报. VBS 的规模、RRH 密度和发射功率可以动态地改变, 以动态有效地适应每个用户容量需求的波动. 文献 [56] 提出了一个基于强化学习的分层分布式资源管理框架, 该框架通过 3 种策略组合实现无线电资源分配策略、干扰协调策略和能量共享策略, 3 种策略均通过强化学习算法不断更新, 共同决定通信资源的分配以及能量的使用或共享给其他基站. 文献 [53~56] 提出了几种不同的通信-能源一体化编排结构, 并依据各自提出的结构, 进行了资源匹配方面的优化, 为后续在通信网与能源网融合架构下的资源管控技术, 以及通信资源、能量资源与业务分布之间的匹配奠定了基础.

在通信网与能源网融合概念提出的背景下, 一些关于降低网络能耗、优化通信资源与能量资源联合使用的研究相继开展. 文献 [57] 建立网络能源消耗模型, 提出了一种无线资源管理算法, 综合考虑通信资源与能量的关联, 研究在 H-CRAN 中最小化能量消耗的最佳 RB 分配和相应的功率分配策略. 文献 [58] 提出了一种由不同类型可再生能源驱动的基站的分布式功率分配算法, 采用了对偶分解法, 将主问题分解为子问题, 通过通信系统与不同类型绿色能源供应之间的迭代协调, 可得到最优的功率

分配, 以最大程度地利用多种绿色能源. 文献 [59] 研究了如何将能量分布、共享与通信资源分配相结合, 以最大限度地减少棕色能量的使用, 降低碳排放, 将 RRH-BBU 关联和非绿色能源最小化为目标的联合优化问题定义为混合整数线性规划问题. 文献 [60] 将通信资源如路由、速率控制、功率分配进行联合优化, 在网络吞吐量的约束下最小化网络能耗, 其中为了搜索最优路由, 使用加权迪杰斯特拉 (Dijkstra) 最短路径算法, 为了匹配能量资源与通信资源, 将算法中的权值定义为节点功耗和剩余能量的函数, 实现了较好的效果. 文献 [61] 在终端到终端 (device to device, D2D) 使能的异构网络背景下, 联合考虑了通信模式选择 (蜂窝模式或 D2D 模式) 和资源分配, 同时保证蜂窝用户和 D2D 用户的 QoS 要求, 制定了一个马尔可夫决策过程问题, 通过强化学习的方式最大化所有用户的能量效率. 在无线接入网系统中, 考虑能量资源与通信资源的联合调度, 为每个用户合理地选择为其服务的 RRH (即用户关联) 是节能减排的一项关键问题. 文献 [62] 考虑到能量分布, 提出了 3 种用户关联策略, 基于最近的用户关联、单候选 RRH 用户关联和多候选 RRH 用户关联.

本小节多次提到了通信资源、能量资源与业务分布三者之间的匹配, 三者之间的匹配是建立在通信网与能源网融合框架下的资源联合调度. 下文将在通信资源与能量资源联合调度的前提下, 分别针对能量资源与业务分布的匹配和通信资源与业务分布的匹配开展详细的研究.

4.1.1 能量资源与业务分布的匹配

业务分布在形式上具体表现为移动通信流量的差异, 移动通信流量具有时间动态性和空间分布性, 流量的特性取决于用户的使用习惯、地理位置、时间分布、网络拓扑结构以及应用程序的类型等, 从而导致基站的能源需求会随着时间波动. 类似地, 能量分布与业务分布具有相似的特性. 绿色能源作为一种分布式可再生能源, 其高度依赖于地理位置、天气条件、时间等因素, 因此也具有时间动态性和随机性.

根据对实际测量数据的观测, 已经有不少研究^[63,64]对业务流量和能量分布的统计特征进行分析, 证明了它们是可预测的. 在常见的绿色能源如太阳能和风能中, 太阳能发电量的随机性相比于风能更小, 其预测值与真实值较为接近, 因此对太阳能发电量的预测是有意义的. 本文使用了 SAM (solar advisor model) 软件, 通过导入西安电子科技大学望远谷体育馆经纬度处的气象文件, 并配置相关太阳能光伏板参数, 设计了该位置处的太阳能发电模型, 预测了 2023 年 1~12 月份的月平均太阳能发电量, 如图 7 所示.

在以下的一些研究中, 如表 5^[65~71]所示, 均通过匹配能量资源与业务分布的方式, 降低了能源的浪费, 减少了不必要的能源消耗, 同时保障了网络系统的稳定性.

文献 [72,73] 分别开发了分布式最优用户关联策略和基于业务感知的动态用户关联方法, 均通过调整业务负载的方式实现负载均衡, 虽然没有与能量分布相匹配, 但为能量分布与业务分布的匹配与优化提供了重要思路. 文献 [65] 提出了两点具有指导性的意见, 一方面基站应确定在当前阶段使用了多少能源、为未来保留了多少能源, 并最大限度地利用分配在各个时间段的绿色能源, 另一方面将流量负载引导到具有更大绿色能源容量的基站, 通过匹配业务分布的方式最大化利用绿色能源, 降低二氧化碳排放. 文献 [66] 引入控制算法, 提出降低基站在某些阶段的能耗, 为未来储备能量, 以保证网络节点即使在高水平的业务负载情况下也不会发生中断. 文献 [67] 专注于基站在各种不确定性条件下的自适应电源管理, 将基站的业务负荷划分为轻度负荷、中度负荷、重度负荷、早晨重度负荷以及夜晚重度负荷 5 种场景, 提出了一种多周期随机规划的电源管理模型, 能够在基站流量负荷不确定的条件下减少能耗. 文献 [68] 利用智能电网的双向能量流动, 重塑蜂窝网络由于能量分布特性造成的非均匀能源供应和能源需求, 优化了能量分布的非均匀特性, 可靠地为蜂窝网络中的时空变化的

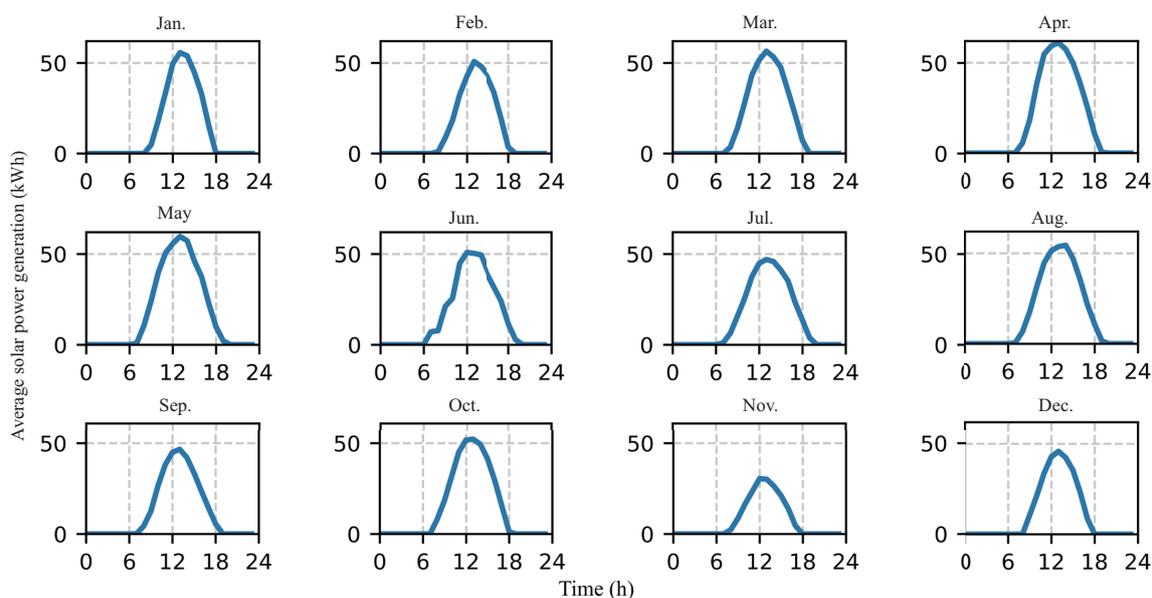


图 7 (网络版彩图) 西电远望谷体育馆 2023 年月平均预测太阳能发电量

Figure 7 (Color online) Monthly average predicted solar power generation for 2023 at Invengo Gymnasium of Xidian University

无线流量供应, 在降低能耗的同时, 减小了能量成本. 文献 [69] 考虑到由于可再生能源的波动性质, 基站所获得的能量与其业务负载不适配的情况, 允许在基站之间传输所获得的能量, 并提出了一种基于 Lyapunov 优化的动态能量感知功率分配算法, 能够在不需要任何信道信息、流量以及网络资源信息的条件下, 依靠能量合作提高能效并实现. 这体现出了能量分布与业务分布相匹配的理念, 但缺乏通信资源的优化. 由于能量到达过程和信道的先验信息不可用, 文献 [70] 提出了一种基于深度确定性策略梯度 (deep deterministic policy gradient, DDPG) 的能源合作与功率分配策略来解决分布式存储网络中的能量协作问题. 文献 [70] 考虑了无线电和能量资源的管理, 但仅考虑功率控制, 并未考虑用户调度、用户的 QoS 要求和小区间干扰等因素. 文献 [71] 提出了一种能量敏捷的分组调度算法, 来塑造弹性移动流量以匹配能量分布, 具体体现为优化数据包调度来平衡基站在各个时间段的能量消耗, 一些数据包的传输将被延迟 h 个时隙, h 是通过业务分布与能量进行匹配得到的, 通过时延以换取主电网的节能. 文献 [74] 利用采集能量的统计信息, 研究了在满足用户 QoS 的情况下最小化电网能耗的资源分配问题. 文献 [74] 通过动态规划的方法, 推导了不同获得能量水平下的平均停电概率, 并依据此概率权衡用户的 QoS 要求, 得到最优资源分配策略, 从而实现了能源感知的通信资源调度, 通过动态调整通信资源的分配, 使得能量分布和业务分布相互匹配, 从而提高能效并保证用户满意度. 值得注意的是, 文献 [60] 提出没有任何损失地在网络实体之间传输能量是不可能的, 损耗可能占传输能量的 7%, 在极端情况下甚至可能达到 55%. 此外, 储能电池也有较高的成本, 将绿能储存在电池中也会产生损耗, 每小时会有 0.1% 的电量损耗. 对于收集到的绿色能源, 存在 3 种使用方式, 包括能源即时使用、能源存储和能源转移. 因此, 对于能量分布与业务分布的匹配而言, 如何充分利用绿色能源成为一个关键问题.

4.1.2 通信资源与业务分布的匹配

绿色能源作为可持续发展的关键, 其重要性体现在对资源的高效利用和对环境影响的最小化. 同

表 5 能量资源与业务分布匹配的研究
Table 5 Research on the matching between energy resource and traffic distribution

文献	主要内容
[65]	将大流量业务引导至绿色能源容量较大的基站, 最大化利用绿色能源, 降低碳排放.
[66]	基站有意识地为未来储存能量, 防止高水平业务负载下网络服务中断的情况, 保障网络系统的稳定性.
[67]	将业务分布按负荷划分为 5 种场景, 根据业务不同业务场景进行多周期随机规划的能量管理.
[68~70]	利用智能电网的双向信息流动, 优化能量分布的非均匀特性, 使基站获得的能量与业务负载相匹配.
[71]	主动延时部分数据包的发送, 塑造弹性移动流量匹配能量分布.

表 6 关于通信资源与业务分布匹配的相关研究
Table 6 Research on the matching between communication resource and traffic distribution

文献	主要内容
[75]	基于深度强化学习, 根据业务感知进行数据卸载与带宽分配, 降低能耗和带宽成本.
[64]	根据对业务流量信息的预测, 提出了短时间尺度与长时间尺度相结合的通信资源分配, 从而降低能量消耗.
[76, 77]	根据业务需求, 按需进行用户关联与资源分配, 降低能量消耗.
[78, 79]	采用机器学习的方式, 依据预测的业务信息进行通信资源联合优化.
[80]	对预测的不确定性增加一些鲁棒性, 提出了移动资源感知的鲁棒性资源分配方法.

样的, 对流量业务分布的有效预测也能显著提升通信资源配置的效率, 减少资源浪费, 从而支持可持续的通信网络发展. 近年来, 在业务分布动态波动下的通信资源分配已经成为一个研究热点. 因此, 一些研究开始从预测的角度出发, 探索通信资源与业务分布的匹配问题, 具体的研究情况如表 6 [64, 75~80] 所示. 这些研究为后续深入理解和改进通信资源的分配提供了重要的参考和启示.

文献 [75] 考虑到无线信道条件会随时间和环境变化, 提出了一种基于深度强化学习的物联网设备数据卸载、带宽分配和业务感知的联合优化方法, 进行通信资源与业务分布的匹配, 降低能耗成本和带宽成本, 然而未将可再生能源视为可管理资源, 未考虑能源的共享, 并未实现能量资源与业务分布的完全适配. 文献 [64] 根据业务分布的特性, 提出了长时间尺度 (分钟或小时) 与短时间尺度 (毫秒级) 相结合的管理方式, 在短时间尺度上优先选择可再生能源驱动的 BS 节点为用户需求提供瞬时供应, 在长时间尺度上对可再生能源的行为进行预测, 结合预测的流量信息进行通信资源的分配以及能量的使用或存储. 文献 [76] 提到了网络部署和通信资源分配的能量消耗应由业务分布决定并进行自适应, 即供需匹配的实现, 建立了一个随机优化问题, 通过动态调整基站的运行模式、实现用户的最佳关联、优化子载波的分配以及功率的分配, 降低了系统整体的能耗. 文献 [77] 考虑了业务分布特征和用户的 QoS 需求的变化, 通过两阶段动态规划算法解决电网平均能耗最小化问题, 第一阶段对基站的开关状态进行优化, 第二阶段调整 RB 分配和可再生能源分配, 并将有限的通信资源优先分配给最需要的区域和用户. 这样的通信资源分配策略可以有效降低能源消耗, 提高网络的容量和覆盖范围. 但不足的仍是不能很好地适应时变的业务流量分布, 仅能在流量均匀分布的情况下实现最优的性能.

鉴于业务分布与能量分布具有一定的统计特征和可预测性, 可将其视为非因果知识, 其二者与通信资源的联合编排与联合优化可能是 NP 难 (non-deterministic polynomial) 的问题, 不容易通过数学直接求解, 一些基于机器学习的方案被提出用来进行资源的匹配与优化. 文献 [78] 使用增强的在线学习进行开发, 根据用户的流量优先级和位置预测对可用的 RB 进行分类, 提出了一种在 H-CRAN 下的通信与能量资源的分配, 但没有考虑到的是能量资源的预测与合理使用. 文献 [79] 设计了一个神经网络模型, 该模型可以通过学习历史通信数据和环境信息来预测不同资源配置方案的能源消耗. 然后, 基于这些预测结果, 模型可以智能地选择和分配通信资源, 以最大程度地提高能源效率. 大多数性能优良的结果均依赖于完美的业务分布与能量分布预测, 这显然是不现实的. 文献 [80] 考虑如何对预测的不确定性增加一些鲁棒性, 提出了移动资源感知的鲁棒性主动资源分配法, 通过利用概率约束编程以

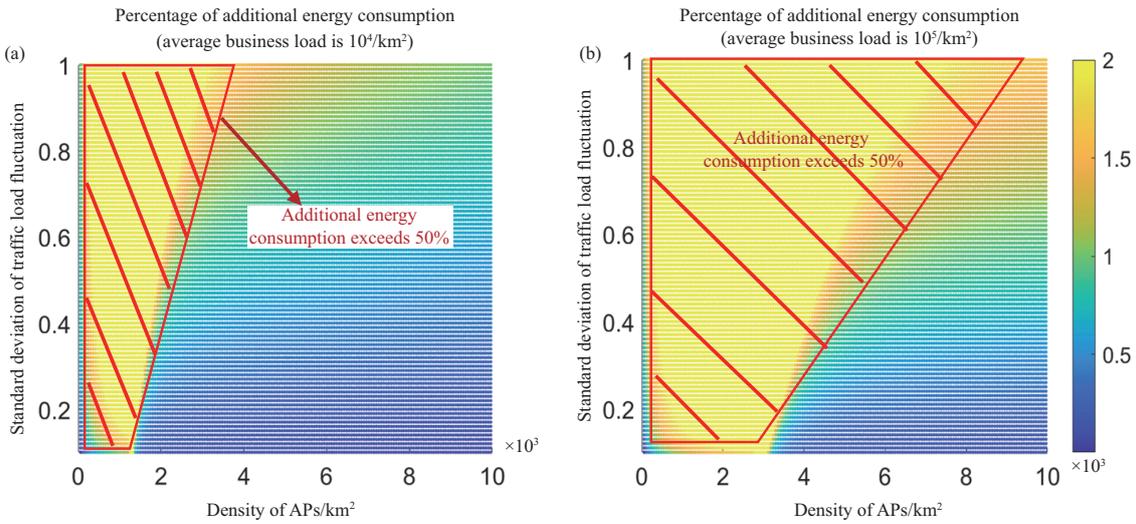


图 8 (网络版彩图) 高能耗区域 – 业务抖动范围 (标准差) 的关系

Figure 8 (Color online) Relationship between high-energy consumption areas and traffic jitter range (standard deviation)

概率意义上建模 QoS 要求, 从而对预测的不确定性具有鲁棒性. 使用隐马尔可夫模型对用户轨迹进行预测, 在时间和频率域中为移动用户预先分配资源.

因此, 鉴于移动通信流量与绿色能源均具有动态性与随机性, 了解绿色能源发电的特性以及移动网络能源消耗的动态性对于设计和优化绿色能源驱动的移动网络至关重要. 不可忽视的是, 在提高能效, 降低碳排放的同时, 仍需考虑通信资源的合理分配、用户的 QoS 需求等, 因此, 如何将能源网与通信网融合, 将通信资源、业务分布与能量分布三者之间进行匹配, 实现能量资源 – 通信资源的一体化编排, 是达成“双碳”目标中的一项关键性问题.

4.2 通信 – 感知 – 能量融合的原生绿色网络架构

上述工作只研究了通信网与能源网融合架构下, 能量分布与业务分布的单向匹配或通信资源与业务分布的单向匹配, 而缺乏关于能量资源、业务分布与通信资源三者相互匹配的研究. 其中, 能量资源与业务分布相匹配的难点在于多能发电电网下, 分布式可再生能源收集与供能的不可预测性会导致能量资源调度和监管复杂 [81]; 而通信资源与能量分布相匹配的难点在于业务分布的空时随机性将导致通信网络负载不均, 产生间歇性电力负荷, 使能量资源的精准投递变得困难. 图 8 揭示了在业务随机到达的条件下, 不同的业务负载波动标准差与接入点密度对应的网络额外耗能百分比. 其中, 负载波动标准差刻画了业务到达的二阶矩, 用以描述业务的随机性与突发性:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{x}} f_{q_c}(\sqrt{x}) dx - \left[\int_0^\infty f_{q_c}(\sqrt{x}) dx \right]^2, \quad (1)$$

其中, q_c 用来描述用户请求数据服务的概率. 考虑到业务请求的抖动性, 这里为非固定值, 其概率密度函数为 $f_{q_c}(x)$. 由图 8 可见, 在接入点密度一定时, 业务负载抖动越频繁, 网络产生的额外能耗越多; 而在业务负载抖动标准差一定时, 接入点密度越大, 引发网络产生额外耗能的能力越小. 因此, 网络密集化是一种克服由业务负载抖动而引发高能耗问题的有效手段. 与此同时, 图中额外耗能百分比超 50% 的区域是实现网络能耗降低 50% 的可行区域, 在该区间内通过优化网络性能、消除业务的随机性, 可

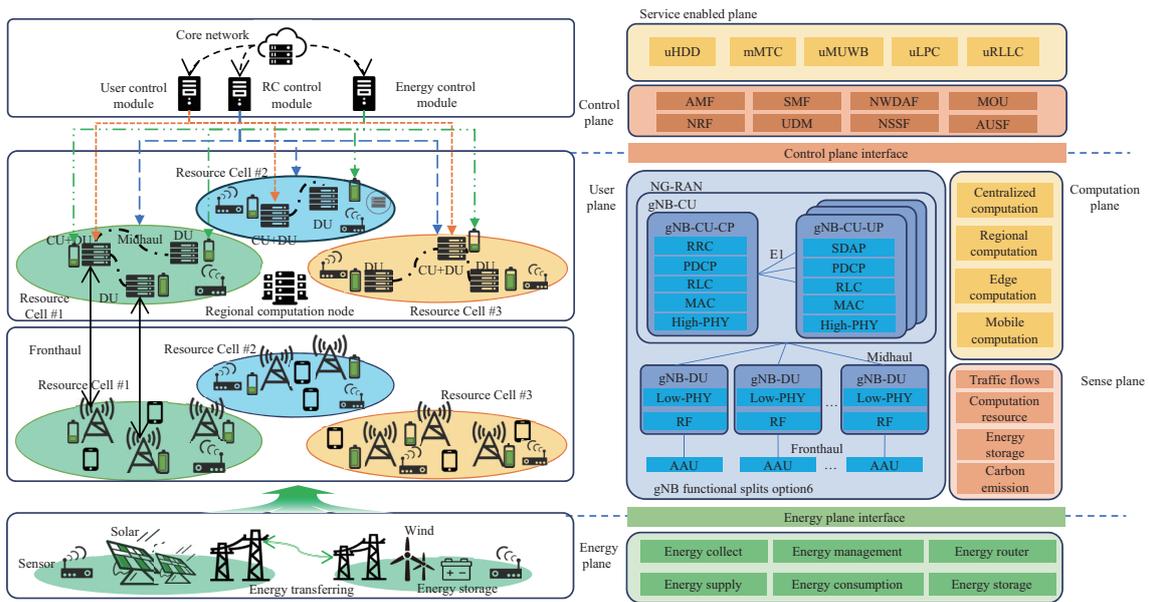


图 9 (网络版彩图) 通信、感知和能量融合的原生绿色网络架构

Figure 9 (Color online) Green-native network architecture: integration of communications, sensing, and energy

显著降低网络耗能。

在上述网络能耗优化可行域的指导下, 本文从消除能量分布与业务分布随机性与不可预测性的角度, 提出一种通信、感知和能量融合的原生绿色网络架构, 如图 9 所示. 相比于传统能源网与通信网融合的架构, 该架构扩展了感知层, 目的是使通信网具备能量感知功能与业务感知功能. 业务感知功能使通信网能够获知终端用户的行为和需求在时间和空间上的演变, 便于网络在复杂场景下做流量预测, 根据网络行为对通信资源进行优化配置; 能量感知功能使通信网实时获取能源的收集状态、存储状态与消耗状态, 结合业务感知功能得到的业务分布, 对能源网进行反馈, 产生与电力负荷相匹配的最优化能源流. 感知层的扩展使通信网预测了业务的分布, 消除了能量分布的随机性, 使能量资源、业务分布与通信资源的相互匹配成为可能.

通过预测业务进行能源流的优化是能源网在已知业务分布条件下的被动匹配, 原生绿色网络架构还支持在已知能量分布的条件下, 通过对业务的整形, 实现同能量分布的主动匹配. 主动匹配的出发点在于可再生能源不如传统能源稳定与可靠, 其分布受到天气、气候、光照、气压、季节等外界环境的影响, 所以能量分布的预测比业务分布的预测更加困难. 因此, 让业务分布适应能量分布, 是一种更加实际的节能手段. 业务整形的基本原理在于网络根据能量分布的变化, 动态调整业务的服务周期, 使波动的业务在一定时间尺度上分批、稳定地完成. 具体可以描述为, 在能量到来的低谷期, 将业务滞后服务, 而在能量到达的高峰期, 将业务集中处理并提前缓存未来可能需要的业务. 业务整形消除了业务分布的随机性, 可进一步增强能量资源、业务分布与通信资源的匹配程度.

依托于该原生绿色网络架构, 仿真模拟了能量资源与业务分布相匹配、通信资源与业务分布相匹配以及三者之间双向匹配 3 种情况下的碳排放量. 仿真场景为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的二维平面, 部署 3 个基站 BS1, BS2 和 BS3, 每个基站的可分配载波数为 5 个, 最大发射功率为 2 W. 为了体现业务非均匀分布的特征, 在 BS1 的覆盖范围内存在 5 个用户, 在 BS2 的覆盖范围内存在 3 个用户, 在 BS3 的覆盖范围内存在 2 个用户, 分别对应重、中、轻三类负载. 设定每个用户的 QoS 需求均为 5 Mbps, 每

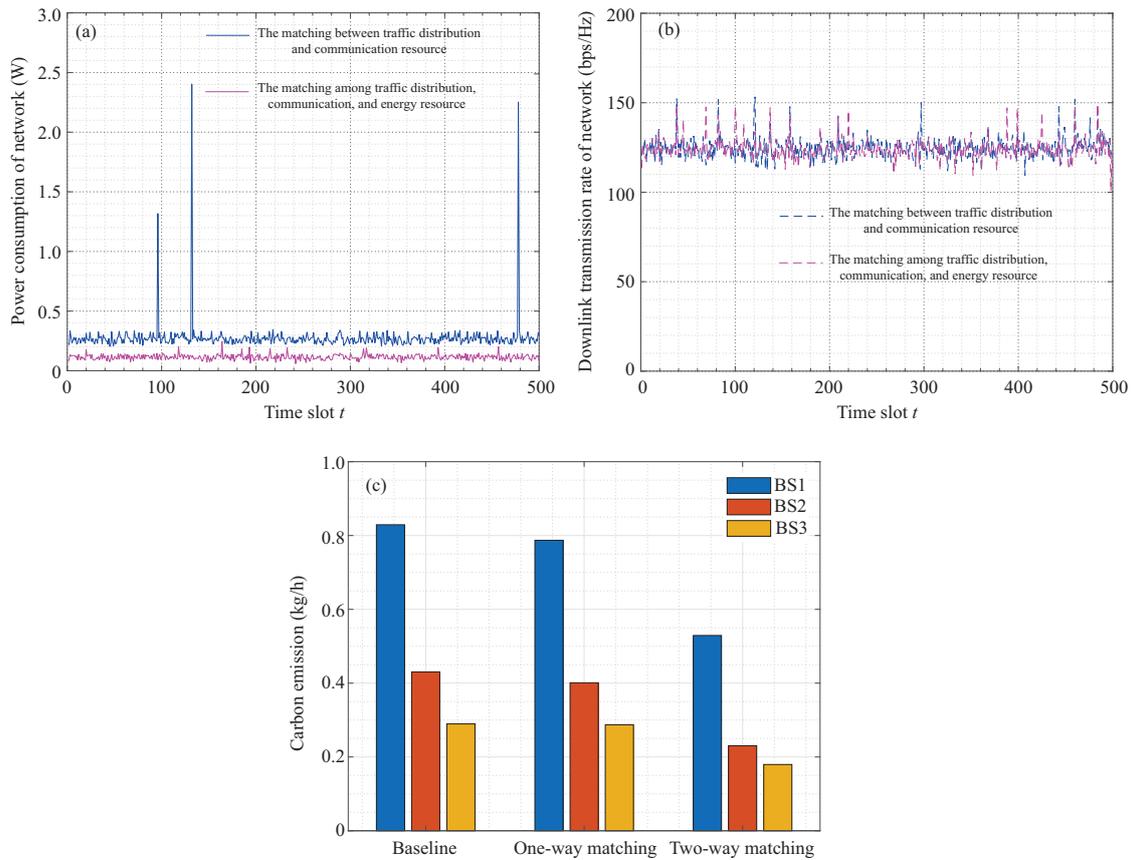


图 10 (网络版彩图) 单向/双向资源匹配下的通信系统性能仿真

Figure 10 (Color online) Performance of network with one-sided or dual-sided resource matching. (a) Power consumption of network versus time slots; (b) downlink transmission rate of network versus time slots; (c) algorithm comparison

个用户只能被一个基站提供服务,且只能占用一个载波,仿真运行 500 次(每次随机生成信道)功率优化,统计并对比单向匹配方法与双向匹配方法下的网络性能。

仿真结果如图 10 所示,结果表明,尽管通过资源分配与功率控制等手段可以保证在整网平均下行速率不变的条件下,降低整网功耗 58% 以上,但是,网络侧功耗降低 50% 并不意味着系统碳排能够降低 50%,其碳排放量仍然处于较高水平.原因在于系统碳排不仅由网络侧能耗所决定,还取决于能源网侧收集到的绿色能源与传统电网输送的电力能源.而通过双向匹配方法可以降低绿色能源在空间与时间上的分布存在随机性与不稳定性,消除业务在空间与时间上到达的突发性,从而能够在降低网络侧能耗的同时,在一定程度上降低系统碳排.证实了原生绿色网络架构同步降低系统能耗与碳排的可行性。

5 未来的困难与挑战

新材料与新器件 [82]. 面向下一代移动通信网络,太赫兹通信成为一种潜在技术.现有研究表明,相较于 5G 系统,太赫兹通信系统频段更高,其关键器件(如,射频放大器)功耗更高,能效更低,广泛地部署与应用必然会导致极高的能耗与碳排.因此,为实现绿色通信,需要从硬件节能,如,低能耗新材料技术、低能耗 PA/天线等器件组件的开发和无源反射面等技术领域开展研究。

休眠机制下潜在的问题 [83]. 不同层级的休眠是网络节约能量, 降低碳排的最直接、有效的手段, 可是在休眠机制下, 基站将进行频繁的开关/激活行为, 对基站的寿命产生影响. 因此一方面需要根据网络负载和预测用户活动来调整休眠周期, 从而优化基站的休眠策略, 减少频繁的启停, 另一方面需要对网络中的业务进行整形, 维持基站的启停周期在一定限度内, 对寿命的影响降至最低.

双网融合下面临的挑战. (1) 通信网和能源网的融合会带来技术标准化和兼容性的挑战, 包括硬件和软件的扩展与维护, 以及对各种设备和传感器的统一管控; (2) 融合通信和能源数据会涉及大量敏感信息, 如, 用户的能源、数据流量的使用情况. 因此, 数据隐私保护和网络安全的防护具有重要意义. 如何保护通信网与能源网产生的隐私信息还面临着困难和挑战.

6 总结

本文面向“双碳”目标, 以提升移动通信网络能效、降低系统碳排为出发点, 对现有绿色通信技术开展调研. 一方面从网络资源与业务分布相匹配的角度, 调研了低能耗的组网技术、传输技术和资源管控技术, 结果表明单一的降低网络侧能耗的方法无法充分减少碳排; 另一方面从能量资源与业务分布匹配的角度, 对通信网与能源网融合架构下的低碳技术进行调研, 结果表明, 能量资源与业务分布相匹配的难点在于流量分布的空时随机性将导致通信网络负载不均, 产生间歇性电力负荷, 使能量资源的精准投递变得困难. 依托于通信网与能源网融合系统, 本文提出一种通信 - 感知 - 能量一体化的原生绿色网络架构, 该架构通过预测业务分布与消除能量分布随机性, 在保障网络服务能力的同时, 降低了系统碳排与能耗, 为构建未来零碳排网络提供了可行的思路.

参考文献

- 1 Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies. *IEEE Veh Technol Mag*, 2019, 14: 28–41
- 2 Huawei. Green development 2030 white paper. 2022 [华为. 绿色发展 2030 白皮书. 2022] https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/industry-reports/green_development_2030.cn.0427.pdf
- 3 ZTE. The green 5G core network white paper. 2023 [中兴. 绿色 5G 核心网白皮书. 2023] https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/white_paper/ZTE_Green_5G_Core_White_Paper_CN1.pdf
- 4 China Mobile. China Mobile peak carbon dioxide emissions carbon neutralization action plan white paper. 2022 [中国移动. 中国移动碳达峰碳中和行动计划白皮书. 2022] <https://www.digitalelite.cn/h-nd-4478.html>
- 5 China Unicom. China Unicom 5G intelligent energy saving technology white paper. 2022 [中国联通. 中国联通 5G 智能节能技术白皮书. 2022] <https://www.digitalelite.cn/h-nd-4632.html>
- 6 China Telecom. China Telecom group carbon peaking action white paper. 2022 [中国电信. 中国电信碳达峰行动白皮书. 2022] <https://www.digitalelite.cn/h-nd-5730.html>
- 7 IMT-2030(6G) Promotion Group. IMT-6G overall vision and potential key technologies white paper. 2021 [IMT-2030(6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书. 2021] http://www.caict.ac.cn/english/news/202106/t20210608_378637.html
- 8 5G Evolution Academic Exchange Forum. Key technology vision of energy saving and emission reduction for 5G-A/6G wireless communication system. 2022 [5G 演进学术交流论坛. 面向 5G-A/6G 无线通信系统节能减排关键技术愿景白皮书. 2022] <https://wirelessbigdata.ustc.edu.cn/home/#/wbd2022/whitepaper>
- 9 ATIS. Green G white paper: the path toward sustainable 6G. 2022. <https://nextgalliance.org/white-papers/green-g-the-path-towards-sustainable-6g/>
- 10 Hexa-X. Designing the 6G networks of the future white paper. 2020. <https://hexa-x.eu/press-releases/>
- 11 ITU. IMT towards 2030 and beyond white paper. 2023. <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/Pages/default.aspx>

- 12 ETSI. The fifth generation fixed network white paper: bringing fibre to everywhere and everything. 2020. https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp_41_FSG_ed1.pdf
- 13 Qualcomm. The future of AI is hybrid white paper. 2023. <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-mar-tech/dm-assets/documents/Whitepaper-The-future-of-AI-is-hybrid-Part-1-Unlocking-the-generative-AI-future-with-on-device-and-hybrid-AI.pdf>
- 14 Ericsson. 6G spectrum white paper: enabling the future mobile life beyond. 2023. <https://www.appt.int/sites/default/files/2023/05/6g-spectrum.pdf>
- 15 Lin Y, Shao L, Zhu Z, et al. Wireless network cloud: architecture and system requirements. *IBM J Res Dev*, 2010, 54: 1–12
- 16 China Mobile Communication Research Institute. C-RAN white paper: towards 5G C-RAN: requirements, architecture and challenges. 2016 [中国移动通信研究院. C-RAN 白皮书: 迈向 5G C-RAN: 需求、架构与挑战. 2016] <https://max.book118.com/html/2018/1122/6000022043001232.shtm>
- 17 Zhu M, Gu J, Zeng X, et al. Delay-aware energy-saving strategies for BBU pool in C-RAN: modeling and optimization. *IEEE Access*, 2021, 9: 63257–63266
- 18 Zhou S, Zhao T, Niu Z S, et al. Software-defined hyper-cellular architecture for green and elastic wireless access. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 12–19
- 19 Niu Z S, Zhou S, Zhou S D, et al. Energy efficiency and resource optimized hyper-cellular mobile communication system architecture and its technical challenges. *Sci Sin Inform*, 2012, 42: 1191–1203 [李志升, 周盛, 周世东, 等. 能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42: 1191–1203]
- 20 Ngo H Q, Ashikhmin A, Yang H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2017, 16: 1834–1850
- 21 Wang D M, Zhang C, Du Y, et al. Implementation of a cloud-based cell-free distributed massive MIMO system. *IEEE Commun Mag*, 2020, 58: 61–67
- 22 Xia X J, Zhang P C, Li J M, et al. Joint user selection and transceiver design for cell-free with network-assisted full duplexing. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2021, 20: 7856–7870
- 23 Zhang X Y, Li J D, Liu J Y, et al. Resource cell—wireless coverage structure for next-generation ultra-dense networks. *Chin J Int Things*, 2023, 7: 1–17 [张夏雨, 李建东, 刘俊宇, 等. 资源小区——面向下一代超密集网络的无线覆盖结构. *物联网学报*, 2023, 7: 1–17]
- 24 Namba S, Warabino T, Kaneko S, et al. BBU-RRH switching schemes for centralized RAN. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Communications and Networking in China*, 2012. 762–766
- 25 Guo X Y, Leng B J, Wu J, et al. Energy-delay tradeoff and optimal base station sleeping control in hyper-cellular networks. *Sci Sin Inform*, 2017, 47: 771–788 [郭雪莹, 冷冰洁, 吴健, 等. 超蜂窝网络能效延时理论关系及最优基站休眠控制. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47: 771–788]
- 26 You X H, Wang D M, Wang J Z, et al. *Distributed MIMO and Cell-Free Mobile Communication*. Beijing: Science Press, 2019 [尤肖虎, 王东明, 王江舟, 等. 分布式 MIMO 与无蜂窝移动通信. 北京: 科学出版社, 2019]
- 27 Femenias G, Lassoued N, Riera-Palou F. Access point switch ON/OFF strategies for green cell-free massive MIMO networking. *IEEE Access*, 2020, 8: 21788–21803
- 28 He Y, Shen M, Wang R, et al. Energy-efficient sleep-mode based on deep reinforcement learning for cell-free mmWave massive MIMO systems. *Acta Electron Sin*, 2023, 51: 2831–2843 [何云, 申敏, 王蕊, 等. 无蜂窝毫米波大规模 MIMO 系统基于深度强化学习的节能睡眠策略. *电子学报*, 2023, 51: 2831–2843]
- 29 Guan L, Ding Y, Li R J, et al. Network energy saving technologies for green 5G. *Telecommun Sci*, 2022, 38: 167–174 [官磊, 丁洋, 李锐杰, 等. 面向“双碳”的 5G 网络节能技术. *电信科学*, 2022, 38: 167–174]
- 30 Foukas X, Patounas G, Elmokashfi A, et al. Network slicing in 5G: survey and challenges. *IEEE Commun Mag*, 2017, 55: 94–100
- 31 Wu Y L, Dai H N, Wang H Z, et al. A survey of intelligent network slicing management for industrial IoT: integrated approaches for smart transportation, smart energy, and smart factory. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2022, 24: 1175–1211
- 32 Afolabi I, Taleb T, Samdanis K, et al. Network slicing and softwarization: a survey on principles, enabling technologies, and solutions. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2018, 20: 2429–2453
- 33 Chang D L, Ding Y F, Xie J Y, et al. The devil is in the channels: mutual-channel loss for fine-grained image

- classification. *IEEE Trans Image Process*, 2020, 29: 4683–4695
- 34 Mao B, Tang F, Fadlullah Z M, et al. An intelligent route computation approach based on real-time deep learning strategy for software defined communication systems. *IEEE Trans Emerg Top Comput*, 2021, 9: 1554–1565
- 35 Mao B, Tang F, Kawamoto Y, et al. AI models for green communications towards 6G. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2021, 24: 210–247
- 36 Gong S, Xie Y, Xu J, et al. Deep reinforcement learning for backscatter-aided data offloading in mobile edge computing. *IEEE Network*, 2020, 34: 106–113
- 37 Sharma S, Darak S J, Srivastava A, et al. Transfer reinforcement learning based framework for energy savings in cellular base station network. In: *Proceedings of URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, New Delhi, 2019. 1–4
- 38 Xiao H Z, Zhao J, Pei Q Q, et al. Vehicle selection and resource optimization for federated learning in vehicular edge computing. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2021, 23: 11073–11087
- 39 Fang C, Yu F, Huang T, et al. A survey of energy-efficient caching in information-centric networking. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 122–129
- 40 Bastug E, Bennis M, Zeydan E, et al. Big data meets telcos: a proactive caching perspective. *J Commun Netw*, 2015, 17: 549–557
- 41 Zahed M I A, Ahmad I, Habibi D, et al. A review on green caching strategies for next generation communication networks. *IEEE Access*, 2020, 8: 212709–212737
- 42 Li L, Zhao G, Blum R S. A survey of caching techniques in cellular networks: research issues and challenges in content placement and delivery strategies. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2018, 20: 1710–1732
- 43 Liu D, Yang C. Energy efficiency of downlink networks with caching at base stations. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 907–922
- 44 Xie R, Li Z, Huang T, et al. Energy-efficient joint content caching and small base station activation mechanism design in heterogeneous cellular networks. *China Commun*, 2017, 14: 70–83
- 45 Zhou S, Gong J, Zhou Z Y, et al. GreenDelivery: proactive content caching and push with energy-harvesting-based small cells. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 142–149
- 46 Niu Z S, Zhou S, Sun Y X, et al. Green communication and networking for carbon-peaking and carbon-neutrality: challenges and solutions. *J Commun*, 2022, 43: 1–14 [牛志升, 周盛, 孙宇璇, 等. 面向“双碳”战略的绿色通信与网络: 挑战与对策. *通信学报*, 2022, 43: 1–14]
- 47 Rao J B, Fapojuwo A O. A survey of energy efficient resource management techniques for multicell cellular networks. *IEEE Commun Surv Tutor*, 2014, 16: 154–180
- 48 Wang K, Yu J, Yu Y, et al. A survey on energy internet: architecture, approach, and emerging technologies. *IEEE Syst J*, 2018, 12: 2403–2416
- 49 Marsan M A, Bucalo G, Caro A D, et al. Towards zero grid electricity networking: powering BSs with renewable energy sources. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, 2013. 596–601
- 50 Jahid A, Hossain S. Dimensioning of zero grid electricity cellular networking with solar powered off-grid BS. In: *Proceedings of International Conference on Electrical and Electronic Engineering*, 2017. 1–4
- 51 Li D, Saad W, Guvenc I, et al. Decentralized energy allocation for wireless networks with renewable energy powered base stations. *IEEE Trans Commun*, 2015, 63: 2126–2142
- 52 Miozzo M, Giupponi L, Rossi M, et al. Switch-on/off policies for energy harvesting small cells through distributed Q-Learning. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, 2017. 1–6
- 53 Zeng D Z, Zhang J, Guo S, et al. Take renewable energy into CRAN toward green wireless access networks. *IEEE Network*, 2017, 31: 62–68
- 54 Hu R Q, Qian Y. An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 94–101
- 55 Pompili D, Hajisami A, Tran T X. Elastic resource utilization framework for high capacity and energy efficiency in cloud RAN. *IEEE Commun Mag*, 2016, 54: 26–32
- 56 Lee H S, Kim D Y, Lee J W. Radio and energy resource management in renewable energy-powered wireless networks with deep reinforcement learning. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2022, 21: 5435–5449

- 57 Zhang Y, Wang Y. A framework for energy efficient control in heterogeneous cloud radio access networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications in China, 2016. 1–5
- 58 Jeon S H, Lee J, Choi J K. A distributed power allocation scheme for base stations powered by retailers with heterogeneous renewable energy sources. *ETRI J*, 2016, 38: 746–756
- 59 Guo S, Zeng D Z, Gu L, et al. When green energy meets cloud radio access network: joint optimization towards brown energy minimization. *Mobile Netw Appl*, 2019, 24: 962–970
- 60 Gkatzikis L, Iosifidis G, Koutsopoulos I, et al. Collaborative placement and sharing of storage resources in the smart grid. In: Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Venice, 2014. 103–108
- 61 Zhang T, Zhu K, Wang J H. Energy-efficient mode selection and resource allocation for D2D-enabled heterogeneous networks: a deep reinforcement learning approach. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2021, 20: 1175–1187
- 62 Zuo J, Zhang J, Yuen C, et al. Energy efficient user association for cloud radio access networks. *IEEE Access*, 2016, 4: 2429–2438
- 63 Willkomm D, Machiraju S, Bolot J, et al. Primary user behavior in cellular networks and implications for dynamic spectrum access. *IEEE Commun Mag*, 2009, 47: 88–95
- 64 Fletscher L A, Suárez L A, Grace D, et al. Energy-aware resource management in heterogeneous cellular networks with hybrid energy sources. *IEEE Trans Netw Serv Manage*, 2019, 16: 279–293
- 65 Han T, Ansari N. Powering mobile networks with green energy. *IEEE Wireless Commun*, 2014, 21: 90–96
- 66 Farbod A, Todd T D. Resource allocation and outage control for solar-powered WLAN mesh networks. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2007, 6: 960–970
- 67 Niyato D, Lu X, Wang P. Adaptive power management for wireless base stations in a smart grid environment. *IEEE Wireless Commun*, 2012, 19: 44–51
- 68 Xu J, Duan L, Zhang R. Cost-aware green cellular networks with energy and communication cooperation. *IEEE Commun Mag*, 2015, 53: 257–263
- 69 Xu B Y, Chen Y, Carrión J R, et al. Energy-aware power control in energy cooperation aided millimeter wave cellular networks with renewable energy resources. *IEEE Access*, 2017, 5: 432–442
- 70 Li Y, Zhao X H, Liang H. Throughput maximization by deep reinforcement learning with energy cooperation for renewable ultradense IoT networks. *IEEE Internet Things J*, 2020, 7: 9091–9102
- 71 Han T, Huang X Q, Ansari N. Energy agile packet scheduling to leverage green energy for next generation cellular networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013. 3650–3654
- 72 Kim H, de Veciana G, Yang X, et al. Distributed α -optimal user association and cell load balancing in wireless networks. *IEEE ACM Trans Networking*, 2012, 20: 177–190
- 73 Wang Y B, Chen S Z, Ji H, et al. Load-aware dynamic biasing cell association in small cell networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, 2014. 2684–2689
- 74 Feng J, Yin X, Meng X, et al. Energy-aware resource allocation with energy harvesting in heterogeneous wireless network. In: Proceedings of International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Barcelona, 2014. 766–770
- 75 Ke H C, Wang J, Wang H, et al. Joint optimization of data offloading and resource allocation with renewable energy aware for IoT devices: a deep reinforcement learning approach. *IEEE Access*, 2019, 7: 179349–179363
- 76 Li Y Z, Sheng M, Sun Y H, et al. Joint optimization of BS operation, user association, subcarrier assignment, and power allocation for energy-efficient HetNets. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 3339–3353
- 77 Gong J, Thompson J S, Zhou S, et al. Base station sleeping and resource allocation in renewable energy powered cellular networks. *IEEE Trans Commun*, 2014, 62: 3801–3813
- 78 AlQerm I, Shihada B. Enhanced machine learning scheme for energy efficient resource allocation in 5G heterogeneous cloud radio access networks. In: Proceedings of IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, 2017. 1–7
- 79 Lee W, Lee K. Deep learning-based energy efficient resource allocation for underlay cognitive MISO interference channels. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 2023, 9: 695–707
- 80 Li J, Zhang X, Zhang J X, et al. Deep reinforcement learning-based mobility-aware robust proactive resource allocation in heterogeneous networks. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 2020, 6: 408–421

- 81 Khan M W, Li G J, Wang K Y, et al. Optimal control and communication strategies in multi-energy generation grid. *IEEE Commun Surv Tutorials*, 2023, 25: 2599–2653
- 82 Joung J, Ho C K, Adachi K, et al. A survey on power-amplifier-centric techniques for spectrum- and energy-efficient wireless communications. *IEEE Commun Surv Tutorials*, 2015, 17: 315–333
- 83 Lopez-Perez D, Domenico A D, Piovesan N, et al. A survey on 5G radio access network energy efficiency: massive MIMO, lean carrier design, sleep modes, and machine learning. *IEEE Commun Surv Tutorials*, 2022, 24: 653–697

Overview of future green mobile communication technologies oriented to the “carbon peaking” and “carbon neutrality” target

Jiandong LI^{1,3}, Xiayu ZHANG^{1*}, Junyu LIU^{1*}, Chenxi ZHAO¹, Min SHENG¹ & Jiang ZHU²

1. *State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;*

2. *Huawei Technologies Co., Ltd., Shanghai 201206, China;*

3. *Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China*

* Corresponding author. E-mail: 22011110207@stu.xidian.edu.cn, junyuliu@xidian.edu.cn

Abstract The “carbon peaking” and “carbon neutrality” target is a crucial strategic layout for China’s 14th Five-Year Plan. It not only represents the fundamental strategic objective towards the green and sustainable development of mobile communication network in the future, but also will establish the Chinese leadership in international carbon asset pricing and the global carbon trading platform. However, the key challenge in achieving green communication lies in reducing energy consumption and carbon emissions of network while maintaining traffic flows growth. On the one hand, this article surveys green communication technologies from the perspective of energy saving and carbon emissions reducing. On the other hand, green communication technologies under the integration architecture of communication network and multi-energy network are investigated. The research results show that the key of realizing green communication depends on mutually matching among network resources, energy distribution, and traffic distribution. But existing technologies can only realize one-way matching between network resources and network distribution, or one-way matching between energy distribution and service distribution. In light of this, this article proposes an intrinsic green-native network architecture characterized by the integration of communication, sensing, and energy, which enables energy sensing and traffic sensing, supporting dual-way matching among network resources, energy distribution, and traffic distribution. Through mitigating the randomness and bursts of traffic and energy distribution, this architecture achieves the continuous increasing of traffic flows while significantly reducing energy consumption and carbon emissions of mobile communication network.

Keywords “carbon peaking” and “carbon neutrality”, green communication, integration of communication network and energy network, green network architecture, energy saving and emission reducing