



社论:

## 智简无线网络理论与技术

张平<sup>1</sup>, 彭木根<sup>1</sup>, 崔曙光<sup>2</sup>, 张朝阳<sup>3</sup>, 毛国强<sup>4</sup>, 全智<sup>5</sup>, Tony Q. S. QUEK<sup>6</sup>, 荣波<sup>7</sup>

<sup>1</sup>北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 中国北京市, 100876

<sup>2</sup>香港中文大学(深圳)理工学院, 中国深圳市, 518172

<sup>3</sup>浙江大学信息科学与工程学院, 中国杭州市, 310027

<sup>4</sup>西安电子科技大学智慧交通研究院, 中国西安市, 710071

<sup>5</sup>深圳大学电子与信息工程学院, 中国深圳市, 518060

<sup>6</sup>新加坡科技设计大学信息系统技术与设计系, 新加坡, 487372

<sup>7</sup>加拿大通信研究中心, 加拿大渥太华市, K2K 2Y7

E-mail: pzhang@bupt.edu.cn; pmg@bupt.edu.cn; shuguangcui@cuhk.edu.cn; ning\_ming@zju.edu.cn;

g.mao@ieee.org; zquan@szu.edu.cn; tonyquek@sutd.edu.sg; bo.rong@canada.ca

本文编译自 Zhang P, Peng MG, Cui SG, et al., 2022. Theory and techniques for “intellicise” wireless networks. *Front Inform Technol Electron Eng*, 23(1):1-4. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2210000>

随着全球新一轮科技革命和产业革命加速推进, 第六代移动无线通信系统(6G)将为产业转型升级和经济创新发展注入新动能, 进一步促进全球产业一体化发展。在6G时代, 无线通信将渗入各个领域, 支持各种新型应用并满足其差异化的极致性能要求, 例如沉浸式或交互式体验应用需要超大带宽的传输速率, 自动驾驶和车联网应用需要超高可靠性和超低延迟, 工业互联网应用需要海量机器类型连接。面对后摩尔和后疫情时代的挑战, 无线通信需要在网络架构上突破, 以提高智能性、安全性、鲁棒性、带宽和异构性。在此背景下, 6G发展具有以下几个重要趋势:

1. 未来无线通信将从满足“人-人”通信发展为满足智能“人-机-物”通信

除实现传统人与人之间的个人通信外, 未来无线网络还将支持个人、机器和物体相互之间的高效无线互联。人类的行为和意图将被智能实时感知, 并及时让机器或物体知悉, 机器或物体将适时地调整或者进行专门的操作。典型应用场景包括智能建筑、智能交通、混合现实(MR)甚至元宇宙等。

2. 通信节点将从纯粹的通信向通信、感知、计算、控制、管理深度融合扩展

基于信息领域的多学科交叉融合, 无线网络将对现有的通信功能进行扩展, 深度融合感知、计算、控制和管理等, 以满足移动MR、智能无人机群、智能体自组网、工业物联网等领域中多样化的极致性能服务需求。例如, 通过感知人体头部位置、预缓存必要内容和渲染高质量图像, 通信节点可以提供完全沉浸式的MR体验。通过无人机自身的态势感知, 进行自动的轨迹调整、抗干扰和容量覆盖自优化, 实现多无人机自组网; 此外, 借助人工智能(AI), 网络节点可以进行无人化的网络规划优化, 实现意图驱动的网络管控。

3. 体系架构将聚焦云、网、算、业务的协同, 这将使协同更加异构泛在

为节约能源、缩短延迟并减轻回传/前传链路容量负担, 边缘计算将与无线网络节点深度协作; 此外, 为了实现无线网络智能支撑不同的场景和应用, 需要云计算、边缘计算、无线网络、算力和业务深度协同, 例如针对低时延高可靠性能需求, 在云端完成AI模型训练, 然后将AI模型部署到网络边缘, 实现边缘智能, 从而减少时延, 增强不同应用的实时智能支撑; 针对大带宽高吞

<sup>‡</sup> 通讯作者

© 浙江大学出版社 2022

吐量需求，可以通过云化处理，也可以通过云化进行智能的网络管理运维等。在架构的异构性方面，基于云-网-算-业协同，进行多维资源的协同编排，可以实现高中低轨卫星、高空平台、无人机、密集蜂窝网络的多维分层一体化覆盖。

简而言之，现有 5G 向 6G 演进，需要适应更加苛刻、更多样化的应用场景，更为严格的能量约束，更加灵活的多维资源协同编排，同时避免网络扩张带来的资源需求急剧增大以及网络架构和协议的过度复杂化。这些挑战寻求一种智简 (intelligise) 无线网络新范式。其中，“intelligise”是应 6G 特征和场景应用需求提出的一个新形容词，代表“智慧内生、原生简约”。以人工智能与下一代组网技术的一体化为基础，智简无线网络持续探究和利用新的智能本原（例如，语义通信中的语义基等），主动以系统熵减为全局优化目标，自适应地重塑信息系统的核心模型，最终实现自身的智慧内生、原生简约。

在此背景下，《信息与电子工程前沿（英文）》(FITEE) 期刊组织了本期“智简无线网络理论与技术”专题。专题涵盖信息论、架构设计和智简无线网络，涉及空天地海一体化、资源管理、硬件测试平台等相关应用。此外，专题旨在回顾智简无线网络研究领域的进展并展望未来研究方向。经严格评审，选录 6 篇文章，包括 1 篇综述和 5 篇研究论文。

孙耀华等从智简无线网络的架构、关键技术和实验平台等方面进行了综述。具体来说，他们首先介绍了意图驱动的无线网络、自动驾驶网络、开放式无线接入网 (O-RAN) 参考架构等元素；然后就人工智能驱动的网络切片、意图感知、智能运维、基于 AI 的云边协同组网和智能多维资源分配等技术进行了深入探讨；最后，为弥合理论研究和实际应用之间的差距，进一步阐述了开放试验平台方面的最新进展，展示了网络人工智能的潜在优势。

智简物联网 (IoT) 可以为众多小型化设备提供超低功耗通信，但传统的软件无线电 (SDR) 平台存在难以快速实施和实验评估等不足。为此，肖菲等提出一种超低功耗的 SDR 设计，可满足超低功耗甚至无源物联网节点的通信研发需求。其核心思想是将  $\mu\text{W}$  级背向散射通信技术有效集成到 SDR 平台，避免使用高耗能有源射频。论文最后评估了不同调制方式下的 SDR 性能，实现了 100 kb/s 的高通信速率，该节点在唤醒状态能耗低

于  $200 \mu\text{W}$ 。

智能反射面 (IRS) 配备大量反射元件，可以产生无线通信所需的反射波束，从而为无线传播重构新的环境，是一种前景广阔的无线传播智简技术。张昱等提出将 IRS 集成到云无线接入网 (C-RAN) 中，可进一步增强 C-RAN 的容量和覆盖范围。他们研究了在用户和射频拉远头之间部署多个 IRS 的场景，并提出一种连续凸近似方法来解决前传容量受限时上行链路和速率最大化非凸问题。通过对发送波束成形、IRS 的被动波束成形和前传压缩噪声的协方差矩阵联合优化，可以显著提升 C-RAN 的上行速率。

边缘智能在支撑工业无线环境中的复杂和动态工业任务方面具有至关重要的作用。许驰等采用多智能体深度强化学习 (DRL)，将每个设备视为一个自学习的智能代理，从而实现端边协同资源分配。与传统 DRL 相比，所提方法可以更好地适应边缘的计算能力、数据大小、所需的计算资源和工业设备的数量。

无人机可极大扩展智简网络的覆盖范围。然而，陆地无线链路和无人机-节点通信链路之间的干扰会降低网络性能。为此，郭婧等提出一种多点协同传输技术，减轻无人机-地面异构网络的干扰。利用随机几何理论进行了严格的理论分析，为覆盖概率评估提出一个易于处理的数学框架，相关的数值分析结果进一步验证了其准确性。

针对 MR 等容量、时延和能耗都具有极高要求的应用场景，多维资源管理至关重要。刘晨熙等首先提出一种移动 VR 分发框架，其同时考虑了上行和下行传输的影响。通过刻画往返时延，揭示了时延对通信、缓存和计算资源分配的量化依赖性；随后提出一种简单高效的优化算法，在满足上下行链路中缓存、计算容量和传输容量约束条件的同时，最大限度地减少往返时延。仿真结果表明，相比其他基准方案，所提算法可有效降低往返时延。

总而言之，该专题广泛涵盖当前与智简无线网络理论和技术相关的多个主题，从软件定义的无线电硬件和波束形成器设计，到人工智能驱动的资源编排、网络覆盖性能分析、多维资源管理等。我们希望这一系列多样而相关的主题能为对智简网络及其相关领域感兴趣的人们提供帮助。

最后，特别感谢作者和审稿人对本专题的大力支持 and 宝贵贡献，同时对期刊编辑和主编潘云鹤、卢锡城院士表示衷心感谢。