

6G 关键技术研发竞争格局与应对策略

朱光旭^{1*}, 李洋¹, 陈怵^{1,2}, 柴殊奇¹, 史清江³, 罗智泉^{1,2,4}

(1. 深圳市大数据研究院, 广东深圳 518172; 2. 香港中文大学(深圳)理工学院, 广东深圳 518172; 3. 同济大学软件学院, 上海 200092; 4. 鹏城实验室战略与交叉前沿研究部, 广东深圳 518055)

摘要: 数字经济作为新的经济形态成为推动经济增长的重要驱动力, 第六代移动通信(6G)与数字经济之间存在着互促和依存的关系, 相应关键技术研发价值重大且国际竞争格局激烈。本文从无线技术、网络技术、安全技术3个维度出发, 系统梳理了6G关键技术研发的原理和发展现状, 评估了我国在这些关键技术方向上的全球竞争力; 具体技术方向包括无线人工智能技术、超大规模天线技术、太赫兹通信、智能反射面、通信感知一体化, 分布式网络技术、“空天地”一体化组网技术、内生智能网络技术、算力网络技术, 物理层安全技术、网络层安全技术、数据安全及隐私保护技术。研究建议, 加速6G无线、网络、安全等核心技术产业化, 以6G网络能力跨越式发展来服务未来业务需求; 注重创新保障、产业支撑、扩大内需、人才保障, 支持创新生态构建, 形成6G产业发展保障支撑; 与全球通信产业开展密切合作, 积极参与6G国际标准制定, 共同推动6G技术产业化。

关键词: 第六代移动通信; 数字经济; 无线技术; 网络技术; 安全技术

中图分类号: TN-91 **文献标识码:** A

Global Competitive Situation of 6G Key Technology R&D and China's Countermeasures

Zhu Guangxu^{1*}, Li Yang¹, Chen Yi^{1,2}, Chai Shuqi¹, Shi Qingjiang³, Luo Zhiquan^{1,2,4}

(1. Shenzhen Research Institute of Big Data, Shenzhen 518172, Guangdong, China; 2. School of Science and Engineering, the Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518172, Guangdong, China; 3. School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Strategic and Advanced Interdisciplinary Research, Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: As a new economic form, the digital economy has become a crucial driver of economic growth. The relationship between the sixth-generation mobile communication (6G) and the digital economy is characterized by mutual promotion and dependence, with significant value in key technology research and intense international competition. This study systematically reviews the principles and current development status of key 6G technologies from three dimensions: 6G wireless technology, network technology, and security technology. It evaluates China's global competitiveness in these key technology directions, specifically including wireless artificial intelligence (AI), massive MIMO technology, terahertz communication, intelligent reflecting surfaces, integrated sensing and communication, distributed networking, space-air-ground integrated networks, AI-native networks, computing power networks, physical layer security, network layer security, and data security and privacy protection. The study strongly recommends expediting the industrialization of pivotal technologies such as 6G wireless, networking, and security. This urgency is aimed at facilitating a

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-11-28

通讯作者: *朱光旭, 深圳市大数据研究院副研究员, 研究方向为无线通信; E-mail: gxzhu@sribd.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“6G带动数字经济双循环发展战略研究”(2022-XBZD-03)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

groundbreaking advancement in 6G network capabilities to meet the evolving demands of future businesses. The emphasis is on safeguarding innovation, providing robust industry support, amplifying domestic demand, and ensuring a steady supply of skilled personnel. Furthermore, it is crucial to endorse the creation of an innovative ecosystem, which will serve as the cornerstone for the sustainable development of the 6G industry. To achieve these goals, the research suggests close collaboration with the global telecommunications industry, active participation in the formulation of international standards for 6G, and collective efforts to propel the industrialization of 6G technology.

Keywords: 6G mobile communication; digital economy; wireless technology; network technology; security technology

一、前言

数字经济以数据为要素、网络为载体，丰富了经济发展的内涵，带来了经济的新增长；作为继农业经济、工业经济之后的一种新经济形态，成为全球经济增长的重要驱动力。我国高度重视数字经济的发展并将其上升到国家战略，2022年我国数字经济规模约为50.2万亿元，对国民经济的支撑引领作用进一步增强。随着数字经济迈入高质量发展阶段，以移动通信网络、数据中心、工业互联网等为代表的新型网络基础设施将发挥经济社会信息流通“主动脉”的作用，支持智能连接、创新融合贯穿至生产生活的各个环节，充分释放数字对经济发展的促进作用。

当前，第五代移动通信（5G）正在开启万物互联的新局面，我国建成了世界规模最大的5G网络并在设备研制、网络优化等方面处于技术领先地位，实现了工业、农业、交通、物流、能源等领域数字化转型场景下的5G广泛应用^[1]。也要注意，新型业务场景对通信网络提出了更多的特性诉求、更高的指标需求，在5G网络仍在持续演进的同时，有必要着眼未来数字经济社会的网络应用需求，适时规划新一代移动通信网络（即第六代移动通信，6G）的发展。实际上，2019年工业和信息化部推动成立了IMT-2030（6G）推进组，集聚网络运营商、设备商、高校和科研机构等“产学研”力量，联合开展6G技术研发。目前，全球6G研究仍处于探索阶段，仅初步形成了6G愿景目标、应用场景、基本指标等的设想及论证。

数字经济的创新发展对6G技术演进提出了全新要求，如更高的频谱效率、更低的时延、更大的容量、更高的可靠性、更智能的网络与终端，以匹配未来智能交通、物联网、增强现实、虚拟现实等场景的应用需求。在5G实现从移动互联到万物互联跨越^[2]的基础上，6G将实现从万物互联到万物智

联的跃迁^[3]。6G和数字经济之间存在互促和依存的关系。一方面，数字中国建设依赖6G引领。与5G相比，6G带来的不仅是网络质量、传输能力的提升，更是感知通信、内生智能、“空天地”一体化网络覆盖等的智能融合，将赋能工业、金融、医疗等行业的智能化转型，为数字经济发展变革提供前提条件。另一方面，数字经济发展、新业态涌现、生产方式升级也驱动6G朝着跨领域协同、“细智高精”方向迈进^[4]。“人机物”将共同主导跨领域的协同生产，高精度、高可靠、高实时的通信需求驱动6G技术发展。

从文献检索可见，已有6G研究重在探讨6G的愿景、挑战与机遇，实现更高速率、更低时延、更大规模连接的技术目标^[5,6]，可能对6G产生重要影响的关键技术（如太赫兹通信、人工智能（AI）、语义通信）^[7]。然而，围绕6G的通信、网络、安全等关键技术方向，梳理研发进展并研判发展竞争力，未见报道。针对于此，本文从无线通信、智能网络、信息安全3个维度出发，梳理6G关键技术的原理和发展现状，评估我国在这些关键技术方向上的国际竞争力，从而明晰6G关键技术研发竞争格局，精准提出我国发展应对策略。

二、6G无线技术研发进展及竞争力研判

6G无线技术是实现6G部署应用的核心关键，相关研发工作已在快速推进，以无线AI技术、超大规模天线技术、太赫兹通信、智能反射面（IRS）、通信感知一体化（ISAC）等为重点方向。

（一）无线AI技术

6G作为新一代移动通信技术，将开启万物互联、深度融合的新阶段。与此同时，AI技术再次经历爆发式发展，正在赋能诸多行业。受到6G、AI发展热潮的驱动，无线通信与AI技术趋向深度融

合并产生新技术——无线AI，集中在AI赋能通信^[1]、通信赋能AI^[8]两个方面：前者指利用AI技术改进现有无线通信系统，使无线通信在深度上实现更高的速率、更低的时延、更广的连接，涉及无线通信的物理层（如信道估计）、链路层（如资源分配）、应用层及网络层（如网络热点内容预测）；后者指利用无线通信网络传输AI服务和智能应用所需的数据，在粒度上实现网络级的泛在智能，又可细分为集中式学习、分布式学习。

自2018年以来，越来越多的手机配置了专用的嵌入式神经网络处理器，为6G时代大范围应用无线AI技术提供了硬件层面的支持。为了规范AI模型的更新和相关数据的获取过程，在第三代合作伙伴计划（3GPP）中加入了网络数据分析功能，支持数据收集和分析；在RAN和SA工作组中分别设立了研究专项，开展数据采集与模型传输研究。这些工作也为无线AI的标准化确立了基础。

随着AI技术的进一步成熟，AI产业具有了相当的规模。无线通信系统即将进入6G时代，将大幅提升面向AI的开放度和支持度。无线通信系统的多个模块将被无线AI模块取代，已成必然趋势。在此背景下，无线AI技术拥有广阔的前景。

（二）超大规模天线技术

随着天线、芯片集成度的不断提高，在不增加尺寸和质量且功耗可控的前提下，天线阵列的规模将持续增大。超大规模天线是在大规模天线基础上的进一步演进。

部署超大规模天线阵列，应用IRS、平面透射表面、纳米天线阵列^[9]等新材料/新结构，引入新的信号处理方法，将提供具有极高空间分辨率和处理增益的空间波束，提高网络的多用户复用能力和干扰抑制能力，获得更高的频谱效率和更高的能量效率。超大规模天线阵列（见图1）具有极高的空间分辨能力，能够实现三维精准定位、目标空间姿态信息获取，具备在三维空间内进行波束调整的能力。

（三）太赫兹通信

太赫兹波指频率位于0.1~10 THz范围的电磁波，在整个电磁波谱中位于微波和红外波频段之间；具有超大带宽的频段资源可供利用，支持超高的通信

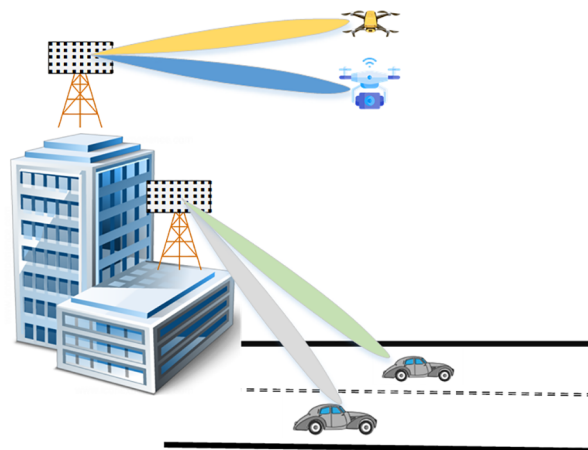


图1 超大规模天线技术应用示意图

速率。太赫兹通信即以太赫兹频段内的载波实现无线通信的技术，被视为实现6G太比特每秒通信速率的空口技术备选方案，有望应用到全息通信、微小尺寸通信、超大容量数据回传、短距超高速传输等高速通信场景。此外，基于太赫兹通信信号的超带宽特性，应用至网络和终端设备的高精度定位、高分辨率感知成像等，也是潜在的拓展方向。

早在20年前，国际上就启动了太赫兹技术研究。国内研究起步稍晚，但以高校和科研院所为代表，正在积极开展相关工作，也以多种形式进行互通协作，共同推动太赫兹技术研发和产业化，目前整体接近世界先进水平。

在太赫兹通信技术研究方面，国内外的重点还集中在核心技术、共性技术攻关上，而对实际应用场景、通信系统环境适应性等的考虑有所不足；与未来多样化通信场景需求相比仍有相当的差距，尚不能满足产业化和大规模部署的要求。因此，太赫兹通信技术研究还需着重关注并攻克实时性、空间复用、低功耗、远距离、工作环境等要素。

（四）智能反射面

IRS是近期发展的技术，支持实现6G无线通信系统智能且可重新配置的无线信道环境^[10]。通常，IRS是由大量无源反射元件组成的平面，每个反射元件都能独立地对入射信号产生可控的振幅以及相位变化（见图2）；在无线网络中密集部署IRS并智能协调产生的反射，即可灵活地重新配置发射器和接收器之间的无线信道，以实现所需的分布。IRS为实质性解决无线信道衰减和干扰问题提供了一种

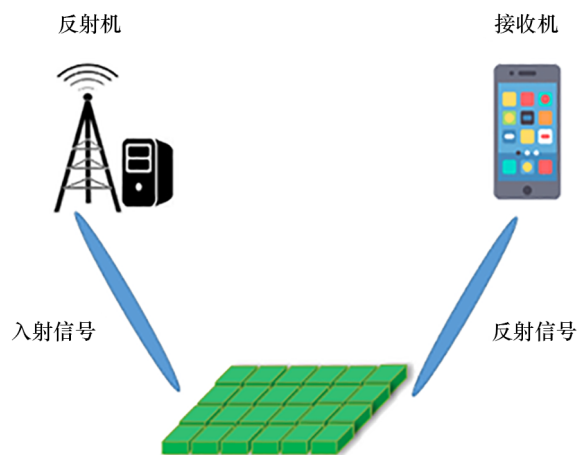


图2 IRS部署示意图

新颖的手段，也能在一定程度上实现无线通信容量及可靠性的显著改进。

近年来，国内在IRS方面开展了较大规模的研究，整体处于世界先进水平。2021年，我国主要的移动通信运营商分别针对3.5 GHz频段、2.6 GHz频段、毫米波频段完成了IRS技术的5G外场测试。IRS理论研究在多个细分方向也较为深入。也要注意，在目前的研究中，IRS具有一定程度的自我反射及投射能力，但能力水平仍有较大提升空间；在超表面材料方面，半导体工艺较液晶工艺更为成熟，但成本偏高；在智能控制方面，IRS只能被动接收信号而无法主动感知周边信道环境以及定位终端与用户位置，实时控制能力仍待增强。未来，需针对IRS基础理论、部署频段、硬件成本、组网架构、调控算法等开展深化研究。

（五）通信感知一体化

ISAC泛指在无线网络中将传感和通信功能整合为一体的设计，以提高稀缺频谱和无线基础设施的利用效率，进而通过传感辅助通信、通信辅助传感^[14]实现互利共赢。与传统的无线网络相比，ISAC可以利用无线基础设施以及有限的频谱、功率资源进行通信和传感，从而以较低的成本提高系统综合性能。

ISAC概念首次出现在2018年“全球通信会议”，依托较为成熟的基础技术条件，已在工业界快速获得初步应用。我国的研究和应用机构积极跟进，将ISAC视为6G的重要技术方向之一，相应产业发展水平与国际主流同步。然而，ISAC尚处产

业发展初期，在开启大规模商用之前还需要解决理论、技术、应用等方面的诸多挑战；在空口技术、组网架构、协同感知、硬件架构、原型系统、仿真评估、标准化方向也需开展持续研究。

三、6G网络技术研发进展及竞争力研判

6G网络技术的支持6G部署应用的重点内容，将深度融合通信、信息、大数据、AI、控制等技术，成为构建物理世界与数字世界连接的“中枢”，支持开启万物感知、万物互联、万物智能的时代。

（一）分布式网络技术

6G网络将采用集中控制式与分布自治式融合、集散共存的新型网络架构^[15]，以在大规模复杂组网环境下实现网络资源和网络能力的优化调度。分布式网络架构涉及多类技术，如去中心化的星际文件系统、支持快速查找及访问的分布式哈希表技术、分布式账本技术等。区块链技术凭借其去中心化、去信任化、不可篡改等技术特性，在5G发展阶段已有应用探索，即利用区块链思维增强网络拓展、网间协作、安全与隐私保护等能力。

区块链技术是6G分布式网络的重要机制，但我国在这一领域的发展水平未能进入国际前列，也没有形成反映技术发展趋势的区块链3.0项目。在技术研究上，国外更加关注基础架构层次的问题，如互操作性、可扩展性等，而国内更关注技术应用。未来，我国需要加强人才培养，改善技术研究和应用环境，更均衡地发展全产业链。

（二）“空天地”一体化组网技术

在6G时代，天基（高轨/中轨/低轨卫星）、空基（临近空间/高空/低空/飞行器）网络将与地基（蜂窝/移动热点/有线）网络深度融合，组成“空天地”一体化网络，实现全域、全时段的网络覆盖^[12]。“空天地”一体化网络不是天基、空基、地基网络的简单互联，而是在系统层面实现地面与非地面网络的全面一体化，在体制、协议、网路、业务、终端等层面实现深度融合（见图3）。

卫星互联网是6G“空天地”一体化的关键。发达国家布局较早，已全面开始星座建设，如星链工程的在轨卫星已超过5000颗，开始面向世界主要

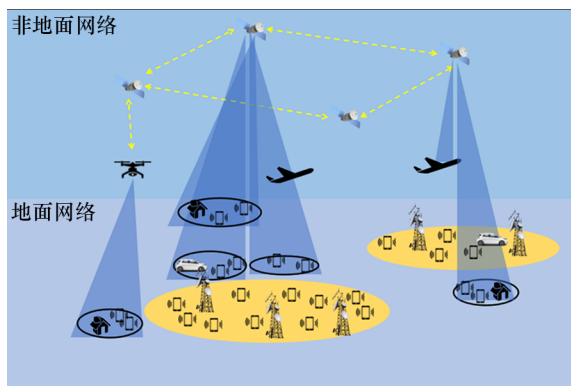


图3 “空天地”一体化网络体系结构

地区提供卫星互联网服务。2020年，我国首次将卫星互联网纳入新型基础设施建设范畴，当前仍处于前期规划与试验阶段。卫星互联网产业链长、保障要求高，需要持续的技术创新、资源投入、发射保障。我国应增强产业链上游的研发制造水平、基础原材料的供应能力，提高下游用户端的应用开发水平，通过快速迭代以优化下游用户端解决方案。

（三）内生智能网络技术

机器学习、AI技术将在6G端到端网络的设计、部署、运营阶段中发挥决定性作用^[13]。内生智能在6G网络架构内部提供数据采集、数据预处理、模型训练、模型推理、模型评估等AI工作流的完整运行环境，将AI服务所需的算力、数据、算法、连接与网络功能、协议、流程进行深度融合，支持AI能力按需编排，为高水平网络自治、多样化业务需求提供智能化基础能力^[14]。6G将构建开放融合的新型网络架构，不仅增强管道连接的性能，更要实现从传统的云AI向网络AI的转变。内生智能网络对内能够利用AI来优化网络性能、增强用户体验，对外能够为各行业用户提供实时AI服务。

相比于美国6G研究组织在云原生技术和生态体系方面的进展，我国在内生智能以及云和6G融合方面的研究仍处于起步阶段。发达国家保持着整体发展优势，以高质量研发、高质量人才、AI芯片、投资融资环境等为基础优势。我国仅在超级计算机、AI应用、大数据等方面具有应用层面的优势。面向未来发展，产业界面临着网络智能化技术体系标准不统一、核心基础算法研究不足、训练数据不开放、必要的验证环境缺乏等迫切问题，需要着力破解。

（四）算力网络技术

算力网络以网络为中心，将计算、存储能力视为可调动的资源，强调算力资源的评估、交易和调度^[15]。在网络和计算深度融合的趋势下，网络演进需要网络和计算相互感知、高度协同，算力网络将实现泛在计算互联，云、网、边高效协同，据此提高网络和计算资源的利用效率，实现实时准确的算力发现、灵活动态的调度服务、具有一致性的用户体验（见图4）。

目前，我国在芯片与计算领域面临着较大发展压力。一方面，算力需求持续增长已经成为经济社会发展的常态；另一方面，算力的来源是芯片，而芯片成为我国科技领域发展受制于人的主要问题。因国际局势变化带来的供应链安全问题、计算成本激增问题，成为我国计算相关产业必须面对的发展困境。发展算力网络，除了依靠通信技术进步，也需在计算相关产业积极布局，尽快破解“卡脖子”环节。

此外，我国异构计算产业布局亟待完善。异构计算相关产业是算力网络落地应用的关键环节，而国内在异构计算相关的加速器、编译器、工具链等基础能力上投入不足，导致产业成熟度整体不高。网络、计算产业融合不深，仍处于简单叠加状态，如设备之间的交互接口、信令协议等标准尚不统一，难以支持算网资源的灵活调度与高效融合。

四、6G安全技术研发进展及竞争力研判

6G安全技术是实现6G网络大规模商用的前提和重点，按照网络中生效的层级可分为物理层安全技术、网络层安全技术、数据安全及隐私保护技术。我国在6G物理层安全技术探索和研发上达到世界先进水平，但在网络层安全、数据安全与隐私保护等技术方向仍处于追赶状态，整体呈现“硬强、软弱”的发展特点。

（一）物理层安全技术

物理层安全技术主要基于信道本身的物理性质来防止信息遭到监听或破坏。无线物理层安全技术作为保障6G网络安全的重要手段之一，可为6G业务提供低复杂度、高能效的轻量级安全防护机制。

① 超大规模多输入多输出（MIMO）可为6G网络

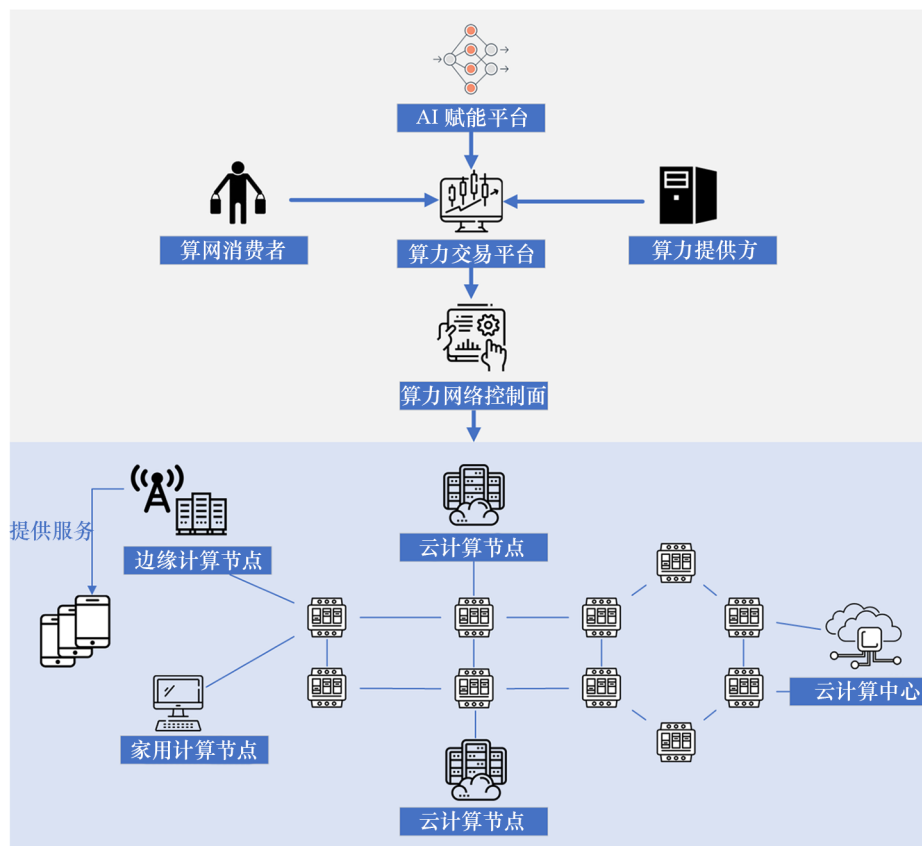


图4 算力网络架构

提供更高的频谱效率、能量效率和灵活性，应用波束赋形、基于人工噪声插入的干扰等方式提升物理层通信的安全性^[16]。② IRS 技术采用可编程新型超材料，通过数字编码对电磁波进行主动的智能调控，从而突破传统无线信道的不可控局限性，实现信道精细化感知和信道定制化生成；克服传统通信安全范式下因电磁环境的不确定性和不可操控性带来的保密信息易泄露、面临复杂干扰等问题，改变现有“外挂式”无线通信系统安全机制造成的通信与安全掣肘、能效低下的情况，提升网络的整体安全性能。③ 可见光通信（VLC）技术是使用可见光作为信息载体的新型无线通信方式、具有独特安全特性的辅助通信手段，光保真技术的发明推动了VLC技术的实用化^[17]；利用可见光无法穿透遮挡物、对电磁不敏感的特点，有效避免传输信息被外部恶意截获，可作为射频通信以外的一种辅助性通信技术。④ 太赫兹通信技术处于电子学向光子学过渡的领域，兼具波通信不易受影响、光通信指向性良好的特点，可实现更好的保密性以及抗干扰、抗

截获能力。

我国在电磁超材料领域的研究起步较早，具有较好的平面透射阵列产业化基础。超大规模MIMO技术与之密切相关。我国在世界上率先启动电磁超材料标准化工作，目前实现了超材料底层技术的专利覆盖，为利用超大规模MIMO实现6G物理层安全筑牢基础。IRS赋能物理层安全技术由我国科学家率先提出，获得了其他国家跟进研究，但实用化面临着硬件、测量等方面的挑战^[18]。我国VLC技术研究起步较晚，但近年来取得了一批实质性研究成果，在系统带宽、安全实时传输、离线传输速率等指标上接近世界先进水平；受制于材料水平，VLC设备小型化困难，仅支持单点对单点传输，缺少专用集成电路^[19]。我国在太赫兹通信技术研发方面部分达到世界先进水平^[20]，但太赫兹通信系统的规模化应用仍存在太赫兹器件体积较大、集成度不高、发射功率有限等难点。

当前，物理层安全技术面临的现实难题是功能实现对半导体材料及集成电路工艺、先进天线技

术、系统资源分配优化、信道建模方法等均提出了较高的要求^[21]。为此,物理层安全理论可依托我国5G发展积累的优势基础予以突破;在硬件开发和产业化方面,推动关联领域开展跨学科、跨行业合作以实现“产学研”协同;面向我国庞大的安全通信市场需求,依托齐全的产业链来实现相关产业的快速高效发展。

(二) 网络层安全技术

网络层支持实现两个网络系统之间的数据透明传送。6G网络的连接密度将达到 1×10^7 个连接/ km^2 ,传统安全技术难以承担如此负荷的监控与防御任务,使6G网络层安全面临极大挑战。①无线AI技术通过学习网络数据、业务数据、用户数据等,实现安全能力弹性编排、全局资源调动与精确风险控制等功能,提升网络安全产品中威胁情报的自动化部署能力和安全能力自适应水平,充分匹配外部和内部威胁的复杂变化。②区块链技术能够适应6G网络架构趋于去中心化、与现有中心式架构兼容共存的组织形式。在新型网络架构的驱动下,6G信任模型可适应性地引入去中心化模式,构建更加包容的多模态信任模型,同时支持中心式、第三方验证/背书的信任模式,基于去中心化的多方共识模式。③轻量级接入认证技术面向6G网络多域异构互联、海量多源终端随机接入、跨域交叉认证与可信访问、通信低时延等特点及应用需求,在保证安全性的前提下设计轻量级接入认证协议;简化协议字段,引入跨域多身份统一管理、终端跨域接入的信任传递、海量差异化终端接入识别等功能,实现多认证体制下海量6G网络设备和用户的跨域随机接入。

国外在讨论6G与内生安全时更针对专长方向,注重特定技术或策略,如6G内生安全在卫星网络^[22]、去蜂窝通信网络^[23]中的应用。相比之下,国内侧重于整体架构研究,如提出了具有内生安全特性的改进型网络架构以及相应的核心技术^[24]。未来,可快速把握AI与网络安全在技术、数据、模型等层面的最佳结合点,尽快形成网络安全领域的“技术差”“应用差”,建立对抗技术博弈优势,掌握网络空间发展的主动权。以国家实验室等优势机构为依托,构建网络安全攻防对抗靶场,通过科学评估、技术挑战赛、测试验证等形式推动网络层安全技术发展;重视基础科学突破对安全领域带来的

颠覆性影响,如密码学理论进展将对高效接入认证协议造成积极或消极的影响。

(三) 数据安全及隐私保护技术

数据安全及隐私保护技术位于物理层和网络层之上,也是网络的重要组成部分,承担着防止数据不因偶然和恶意的原因遭到破坏、更改、泄露的任务。在6G网络场景下,无线通信将与移动计算技术结合,相应数据具有多源异质、跨域访问、信任体制多样的特点,网络将访问更多用户的隐私信息。这就驱动网络对隐私信息的精准感知与动态度量,隐私保护机制的优化组合与按需保护,网络分治、自治和安全计算等提出了较高要求。6G网络具有多网融合特点,基于网络切片技术的资源分配策略能够保障数据的可信共享与安全交换。信息流转路由控制、跨境/跨系统数据传播管控、面向资源切片的流转监测等功能,为大规模数据的监测与资源调度提供了技术支撑。此外,对传输的数据进行加密也是重要的保护方式,而随着量子计算理论的发展,部分经典模型下的计算困难问题可在量子计算模型下进行有效求解,也使现有的密码算法面临严峻的挑战。需要考虑采用抗量子攻击密码来保证6G网络的安全性。

从国际网络安全市场的角度看,美国企业占据着主导地位,在市场规模、技术实力、产品性能、服务水平上领先其他国家的企业。我国网络安全产业近年来发展迅速,但产业规模较小(在国际市场份额中的占比不到10%),而从业公司超过2000家,相应市场竞争十分激烈。我国在量子领域具有国际竞争力,但其中的抗量子密码算法方向与世界先进水平存在一定差距。在未来6G的发展情境下,采取“产学研”协同并突出市场需求驱动,开展数据安全及隐私保护技术研究、新兴关键技术研发和标准化工作,以尽快达到国际发展前沿。

五、6G关键技术研发建议

(一) 技术攻关

开展关键技术创新,前瞻布局无线通信、网络架构、安全保障等研究,增强基础理论研究和核心技术攻关能力。当前在役的5G网络,其自主优化、自主维护能力亟待优化和加强。应在无线AI、大规

模阵列天线、智能感知与自适应控制等无线核心技术方向上予以突破并尽快实现产业化应用，以 AI、大数据等信息技术与各领域的深度融合应用为导向，推动 6G 无线技术尽快从实验室研发转向产业化应用。

5G 聚焦增强移动宽带服务，而对于海量物联网设备接入，高可靠、低时延服务等应用的支撑力度不足。完善 6G 网络技术发展的顶层方案及规划，在分布式网络、“空天地”一体化组网、内生智能网络等核心方向上开展重点攻关。以提升网络能力为直接目标，构建适配多样化应用需求的网络开放平台，以 6G 网络能力的跨越式发展来服务全行业、全场景的业务需求。

5G 的网络安全、用户隐私保护能力有所不足，存在对抗安全隐患。6G 网络中将有海量的异构终端，对高精度接入且可信的保障要求高，需要构建 6G 网络内生安全可信体系。重点开发以超大规模 MIMO 网络架构、IRS、VLC 等为主要内容的 6G 安全内生技术，推动区块链安全技术、软件定义网络等安全应用的深化发展。

（二）保障支撑

在创新保障方面，增强 6G 技术支撑能力，通过战略引导、“产学研用”协同创新等方式推动 6G 技术及标准研究。注重 6G 网络终端、框架、软件安全方面的技术升级，促进 6G 技术创新、标准制定、技术保护的统筹发展。实施科技专项牵引，支持高校、企业、科研院所联合开展 6G 技术研发，突出实践与验证，避免技术发展过度理论化。

在产业支撑方面，围绕 6G 技术发展和应用创新，支持新型感知网络、新型能源、车联网赋能智慧城市等新型基础设施的发展。建设 6G 网络示范项目，开展无线农业、低空经济、远程医疗等互联网示范应用。推动各行业开放数据接口，激发数据应用和服务需求，支持数据驱动型应用研发，加快技术产业化进程。

在扩大内需方面，结合国家和地区产业发展实际，挖掘行业和个人用户对 6G 业务多样化的需求以提高相应消费潜能。培育新型内需体系，鼓励以 6G 网络为基础的新型互联网商业模式探索，利用 6G 技术推动数字经济更好服务和融入新发展格局。

在人才保障方面，建议实施灵活高效的人才引

进、培养、评价及激励政策。通过高层次拔尖创新人才培养，为青年科研人才发展提供优质平台；设立人才储备库，实施面向青年人才的“揭榜挂帅”项目模式。构建协同创新模式，实施技术挑战赛制，吸引各方面人才参与 6G 发展生态建设。

（三）国际合作

提高 6G 产业的国际竞争力、深化 6G 核心技术研发及数字经济发展，需要与全球通信产业开展密切合作。建议国内运营商、设备商积极参与或组建国际联合研发团队，国内高校与海外高校开展科技交流和合作研究。积极参与 6G 国际标准制定，扩大我国 6G 标准方案的国际影响力，避免国内国际相关标准及产业的分裂。

参与完善数字贸易规则，秉持互利共赢原则，推动建立公平透明的国际数字贸易规则体系。围绕 6G 关键技术构建基础共性产业体系，联合开展跨境示范研究和应用，共同推动 6G 技术的工程化和产业化进程。优化全球供应链布局，共享信息基础设施，拓展 6G 数字经济应用的新场景。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 3, 2023; **Revised date:** November 28, 2023

Corresponding author: Zhu Guangxu is an associate research fellow from Shenzhen Research Institute of Big Data. His major research field is wireless communication. E-mail: gxzhu@sribd.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on National Grain Security Strategy in the Context of Dual Circulation” (2022-XBZD-03)

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 中国 5G 发展和经济社会影响白皮书 (2022 年) [EB/OL]. [2023-07-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202301/P020230316604298102966.pdf>. China Academy of Information and Communications Technology. China's white paper on 5G development and economic and social impact (2022) [EB/OL]. [2023-07-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202301/P020230316604298102966.pdf>.
- [2] IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond [EB/OL]. (2015-09-15)[2023-07-15]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf.
- [3] From cloud AI to network AI: A view from 6GANA [EB/OL]. (2021-05-31)[2023-07-15]. <http://6g-ana.com/upload/file/20210619/6375969458505193666851527.pdf>.
- [4] 6G drivers and vision v1.0 [EB/OL]. (2021-04-19)[2023-07-15].

- https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Drivers-and-Vision-V1.0_final_New.pdf.
- [5] Saad W, Bennis M, Chen M Z. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems [J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 134–142.
- [6] Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28–41.
- [7] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G 移动网络关键技术 [J]. *通信学报*, 2022, 43(7): 189–202.
Zhang H J, Chen A Q, Li Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network [J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(7): 189–202.
- [8] Shen X M, Gao J, Wu W, et al. Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(1): 1–30.
- [9] Faisal A, Sameddeen H, Dahrouj H, et al. Ultramassive MIMO systems at terahertz bands: Prospects and challenges [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(4): 33–42.
- [10] Wu Q Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design [C]. Abu Dhabi: 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2018.
- [11] Liu F, Cui Y H, Masouros C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728–1767.
- [12] IMT–2030 (6G)推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 北京: IMT–2030 (6G)推进组, 2021.
IMT–2030 (6G) Promotion Group. 6G network architecture vision and key technology outlook white paper [R]. Beijing: IMT–2030 (6G) Promotion Group, 2021.
- [13] Hoydis J, Aoudia F A, Valcarce A, et al. Toward a 6G AI-native air interface [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(5): 76–81.
- [14] 中国移动研究院. 6G 无线内生 AI 架构与技术白皮书 (2022) [R]. 北京: 中国移动研究院, 2022.
China Mobile Research Institute. 6G native AI architecture and technologies white paper (2022) [R]. Beijing: China Mobile Research Institute, 2022.
- [15] Letaief K B, Chen W, Shi Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(8): 84–90.
- [16] Ylianttila M, Kantola R, Gurtov A, et al. 6G white paper: Research challenges for trust, security and privacy [EB/OL]. (2020-04-24)[2023-07-15]. <https://arxiv.org/abs/2004.11665.pdf>.
- [17] Arfaoui M A, Soltani M D, Tavakkolnia I, et al. Physical layer security for visible light communication systems: A survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(3): 1887–1908.
- [18] IMT–2030 (6G)推进组. 智能超表面技术研究报告 [R]. 北京: IMT–2030 (6G)推进组, 2021.
IMT–2030 (6G) Promotion Group. Reconfigurable intelligent surface technology research report [R]. Beijing: IMT–2030 (6G) Promotion Group, 2021.
- [19] 迟楠, 贾俊连. 面向 6G 的可见光通信 [J]. *中兴通讯技术*, 2020, 26(2): 11–19.
Chi N, Jia J L. Visible light communication towards 6G [J]. *ZTE Technology Journal*, 2020, 26(2): 11–19.
- [20] IMT–2030 (6G)推进组. 太赫兹技术通信研究报告 [R]. 北京: IMT–2030 (6G)推进组, 2021.
IMT–2030 (6G) Propulsion Group. Terahertz technology communications research report [R]. Beijing: IMT–2030 (6G) Promotion Group, 2021.
- [21] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述 [J]. *通信学报*, 2020, 41(5): 168–186.
Xie S, Li H R, Li L X, et al. Survey of terahertz communication technology [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(5): 168–186.
- [22] Peng M G, Li Y, Jiang J M, et al. Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 126–135.
- [22] Liu Y, Wang H S, Peng M G, et al. DeePGA: A privacy-preserving data aggregation game in crowdsensing via deep reinforcement learning [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 4113–4127.
- [24] 彭木根, 艾元. 异构云无线接入网络: 原理、架构、技术和挑战 [J]. *电信科学*, 2015, 31(5): 47–51.
Peng M G, Ai Y. Heterogeneous cloud radio access networks: Principle, architecture, techniques and challenges [J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(5): 47–51.