

# 6G 关键技术标准化的思考与建议

罗延, 权伟\*, 张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 在第五代移动通信技术 (5G) 商用后, 第六代移动通信技术 (6G) 研究逐步展开, 以为数字经济发展、数字基础构建提供支撑。目前, 各国开始争夺 6G 标准的研制优势, 6G 标准化竞争较为激烈。本文从发达国家 6G 技术研究、6G 标准研发的国际合作、我国 6G 技术研究等方面全面梳理了全球 6G 标准的发展现状; 总结了 6G 融合应用与标准化进程, 涵盖算力网络标准化、区块链标准化、数字孪生标准化、人工智能标准化、全息通信标准化等主体内容。研究认为, 我国可超前开展 6G 关键技术标准的布局, 重点开展太赫兹技术、智能超表面技术、智能全息无线电技术、超大规模多入多出技术、通信感知一体化技术研究。为此建议, 加强 6G 关键技术自主创新、推动 6G 基础产业自主发展, 加快跨领域协同合作创新、制定 6G 关键技术标准体系, 深化 6G 技术国际合作、构建开放共赢全球产业生态。

**关键词:** 6G; 标准制定; 太赫兹; 算力网络; 通信感知一体化

**中图分类号:** TN91 **文献标识码:** A

## Standardization of 6G Key Technologies: Thoughts and Suggestions

Luo Yan, Quan Wei\*, Zhang Hongke

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Research on the sixth-generation mobile communication (6G) technology starts gradually after the commercialization of the fifth-generation mobile communication (5G) technology, thus to support the development of digital economy and the construction of digital infrastructure. Countries worldwide are now competing for the establishment of 6G standards. This study reviews the development status of 6G standards from the aspects of 6G technology development in major developed countries and regions, international cooperation in 6G standards development, and 6G technology development in China. Moreover, it explores the integrated application and standardization progresses of 6G technology, involving the standardization of computing power networks, blockchain, digital twins, artificial intelligence, and holographic communications. China can make plans in advance for the standardization of 6G key technologies, focusing on terahertz, smart metasurface, smart holographic radio, super-large-scale MIMO, and communications-perception integration technologies. Furthermore, the following suggestions are proposed: (1) strengthening the independent innovation of 6G key technologies to promote the independent development of 6G basic industries; (2) accelerating cross-industry cooperation and innovation to establish the standards system for 6G key technologies; and (3) deepening international cooperation on 6G technologies to help create an open and win-win global industrial ecology.

**Keywords:** 6G; standards establishment; terahertz; computing power network; communications and perception integration

**收稿日期:** 2023-10-08; **修回日期:** 2023-11-10

**通讯作者:** \*权伟, 北京交通大学电子信息工程学院教授, 研究方向为新型网络体系结构; E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn

**资助项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022YJS004); 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); 中国博士后科学基金面上资助项目(2023M730206)

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

## 一、前言

《“十四五”数字经济发展规划》(2022年)提出,加强数字基础设施建设,完善数字经济治理体系,推动数字经济健康发展,为数字中国的建设提供有力支撑<sup>[1]</sup>。目前,我国第五代移动通信技术(5G)处于国际领先水平,无论是5G的主要专利申请量、商业化运用还是全球性的科技标准设立,都具有一定的竞争优势。然而,随着5G的逐步规模化商用,第六代移动通信技术(6G)成为“产学研”各界新的关注热点。6G是获取全球网络竞争新优势的重要基础领域,也是构建平台经济、数字经济,推动电子消费、数字贸易的重要数字“新基建”,将为我国数字经济发展、数字中国构建提供新助力。

目前,国内外的6G研究处于起步阶段,但竞争情况异常激烈。中国、美国、日本、韩国、欧盟等主要国家和地区都在积极推进6G布局,通过联盟合作等方式,加快推进6G关键技术研究,抢占6G标准制定高地。主要的合作组织有美国的Next G联盟、日本的Beyond 5G、欧盟的Hexa-X、中国的IMT-2030等。然而,在与6G相关的潜在技术研究上,发达国家已有较大优势,如美国的太赫兹、日本的轨道角动量等技术在6G通信上都取得了阶段性成果;我国在技术研发方面存在着基础薄弱等短板,面临着发达国家主导技术垄断的风险,表现在6G潜在关键技术储备不足、6G发展计划的时间靠后、理论创新尚需突破等。因此,为了继续在通信领域保持6G的领先地位,打破发达国家的技术垄断,我国亟需开展针对6G的技术和标准化研究。

本文立足当前6G标准技术的研究现状,分析6G相关潜在关键技术,构思6G标准化发展过程,研判部分技术方向对6G标准化过程的影响,以期对6G技术和标准化研究提供参考。

## 二、全球6G标准研究现状

当前,全球6G研发已经展开,各国都积极抢占6G技术战略优势,争取获得通信领域的主导权。美国、韩国、日本、欧盟等国家和地区都已开始为研发6G标准技术做准备,国际电信联盟无线电通

讯组(ITU-R)、第三代合作伙伴计划(3GPP)也针对6G研究提出了规划和建设,并确定了研究计划的时间表。2021年初,ITU-R启动了《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》研究工作(即6G愿景),完成了面向IMT-2030(6G)的愿景建议,就IMT-2030(6G)的愿景达成全球共识,将于2026年确定需求和评估方法,2030年完成6G规范输出。2019年,3GPP公布了6G研究时间表,将于2023年开始6G研究,2025年下半年开始进行6G技术标准化,预计2028年下半年将会有6G设备产品面市<sup>[2]</sup>。欧盟则开始实施第九期“地平线欧洲”研发计划(2021—2027年),总投资额为955亿欧元,2023年开始6G-非地面网络(NTN)研究项目,旨在设计和验证6G网络充分集成NTN关键技术,推进标准化工作。移动通信领域正以6G为契机进行着一场新的技术竞争。

### (一) 发达国家6G技术研究现状

美国在6G技术研究领域积极推动太赫兹等6G潜在技术的研究。2019年,美国联邦通信委员会(FCC)首次公开了用于6G技术测试的95 GHz~3 THz频段的太赫兹频谱。美国Keysight公司在2022年3月获得了FCC授予的首张6G试验许可证,开始研究基于亚太赫兹频段的扩展现实和数字孪生等应用<sup>[3]</sup>。太赫兹技术成为6G研发的重要技术,美国因启动较早、投入较多而在此技术方向表现出显著优势。除了在太赫兹技术方向有领先优势,美国在卫星互联网方面也处于领先地位。美国太空探索技术(SpaceX)公司推进“星链”计划,致力于发展覆盖全球范围、以卫星为核心的网络系统<sup>[4]</sup>。截至2022年7月24日,“星链”计划已经成功地将超过2800颗卫星送入轨道。5G与低轨卫星的互补性可推动低轨卫星发展,相关技术是未来6G的重要组成部分,“星链”计划在一定程度上推动着美国6G技术的发展。

韩国率先实现了5G电信商业化,拥有5G技术的良好基础。2019年,韩国建立了6G科学研究团队,三星公司也设立了6G研究中心<sup>[5]</sup>。2020年4月,韩国为了确保6G的发展,深入研究了6G技术开发项目的可行性,涉及科技、政策和经济等领域。《引领6G时代的未来移动通信研发策略》(2020年)明确提出了韩国6G的规划、策略目标、支持举

措<sup>[5]</sup>。韩国计划在2026年发布6G通信模拟器，在2028—2030年成为全球首个将6G商业化的国家。2022年，韩国LG公司成功利用6G太赫兹频段在320 m或更远的直线距离上完成通信信号的传输。此外，韩国计划于2031年发射低轨道卫星，开展相关技术测试。

日本高度重视6G的技术研发及标准制定，在太赫兹技术所需的通信电子材料方面处于近乎垄断的位置，率先研究出太赫兹无线传输芯片并实现低成本的太赫兹通信，具备了高速数据传输的能力<sup>[6]</sup>。尽管验证了太赫兹通信，但6G的穿透能力弱、传输距离短，因而使用轨道角动量技术，将个数为5G数倍的电磁波进行叠加传输以增大信号传输距离。目前，日本在6G标准制定和技术研发方面处于领先地位。

英国的6G Futures研究中心由伦敦国王学院和布里斯托大学联合创建，汇聚了计算机、人工智能、通信、社会科学等领域的众多学者，专注于6G在交通、能源、医疗等垂直领域中的应用研究。

德国主要依靠大学和研究机构并与企业进行协作，以尽早将6G技术应用于实际场景，率先在260 GHz频段上完全实现太赫兹信号的接收和传输。尽管相应传输距离仅有1 m，然而如果采用6.5 cm的透镜天线，传输距离将增加一百倍左右。德国与日本联合发展的300 GHz频段通信技术和完整的收发系统，处于世界领先地位。

芬兰率先发布了6G的白皮书，将“泛在无线智能”作为研究核心理念。2018年，芬兰启动了6G重大研究项目，将无线通信方案、器件设备研发、分布式系统通信、生态系统构建作为主要的战略研究方向。芬兰也积极与日本、新加坡开展合作研究。

### （二）6G标准研发的国际合作

发达国家积极探寻有关6G标准研究的国际合作。美国积极联合其他国家共同研发以抢占6G领先优势。从2020年开始，美国与韩国、欧洲等开展6G技术合作，通过签订合作协议、共同研发关键技术等形式，试图把握新一代移动通信领域的话语权与主导权。2021年，美国与日本联合投入45亿美元来促进6G以及网络安全领域的协作。2021年5月，美国、韩国就加强6G、半导体等产业合作进

行协商。Next G联盟是美国企业主导，与欧洲、日本、韩国等主要信息通信公司联合创建的电信行业解决方案联盟，旨在推动6G研发、测试和商业应用的全过程合作。2022年2月，Next G联盟发布《6G路线图》，明确了6G的长期目标、技术路径和发展方向。同时，美国政府强调从政策措施、资金援助、科研项目等方面推进6G研究<sup>[9]</sup>。

韩国也在积极寻求与各方合作。2019年，韩国电子通信研究院和芬兰奥卢大学达成合作协议，旨在联合研究6G网络技术。2021年，韩国和美国签署联合研究协议，就6G技术的未来发展、加强联合研究等达成共识，从而启动6G的共同研究。日本设立Beyond 5G推进战略，大力推动6G技术集成研究，与欧盟的Hexa-X、美国的Next G建立了合作关系，积极开展6G的联合研发。

欧盟加强公私合作，积极布局6G研究项目。6G重大项目Hexa-X、Hexa-X-II分别于2021年1月、2023年1月正式启动，合作伙伴数量从20多家扩大到44家，目标是实现6G愿景、引领关键技术研发、探索可能技术路径、构建新型网络架构等<sup>[7]</sup>。2022年6月，欧洲的6G智慧网络和业务产业协会与中国的IMT-2030（6G）推进组建立了合作伙伴关系，签订了6G发展协议，计划在6G的未来方向、核心技术、标准规范、试验测试等方向展开深度协作，共同促进6G标准建立和产业生态的全球性协调。

### （三）我国6G技术研究现状

我国通信标准化协会在2018年即提出了6G的愿景和相关要求。2019年，IMT-2030（6G）推进组成立，为6G技术研究提供有力保障。在成立后的3年期间，推进组公开了6G白皮书和关键技术研发报告。《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书（2021年）完成了6G的潜在技术与相关应用分析。《6G典型场景和关键能力》白皮书（2022年）则在已有基础上，对6G的发展推动因素、标志性特征、市场应用走向等进行了更深入的探讨。在国际合作上，IMT-2030（6G）推进组在2022年6月与欧洲6G智慧网络和业务产业协会达成协议，共同促进6G标准和技术的全球生态构建。

我国的通信企业也在积极布局6G。2019年，华为技术有限公司（华为）表示已经建立了6G开

发实验室，开始对6G的相关科学和规范进行探索。2020年，华为与银河航天（北京）科技有限公司、中国联合网络通信集团有限公司共同签署了合作协议，共同推动“空天地”一体化发展，在6G的相关技术领域开展联合研究。目前，相关企业在6G技术探索上有所突破，如“通信方法及装置”专利已经可以应用到6G系统中。三大运营商也分别开展了6G研发工作，与高校和企业合作研发下一代互联网的关键技术和相关标准。其他企业也启动了6G的相应探索。中兴通讯股份有限公司组建了6G研究小组，重点探讨6G网络架构。OPPO研究院在2021年公开了首份6G白皮书，阐述了关于未来通信网络结构的具体方案。Vivo通信研究院在2022年7月公布了关于6G服务、能力与使能技术的研究报告，阐述了最新研究进展和成果。

从国际合作以及国内合作的研究现状来看，各国都启动了6G研究，如设立6G相关研究组织、确立6G研究计划、发布6G白皮书和研究报告、开展6G合作与潜在关键技术研究等。这些工作都为我国后续6G研发提供了参考。为了抢占6G标准化的领先优势，需要结合6G应用场景和关键技术开展有关6G标准化的探索和思考。

### 三、6G的融合应用与标准化进程

有关6G标准制定的国际行动尚未正式开展。为了实现6G的标准化，需要从现有技术和应用场景中进行探索。6G将在算力网络、区块链、数字孪生、人工智能、全息通信等多个应用场景和领域得到广泛的支持，为实现真实物理世界的数字智能化提供有力的支撑。未来6G标准的制定将与这些场景、技术和领域有着密切联系，6G标准化进程可据此推进。

#### （一）算力网络标准化进程

算力网络是一种基于算力资源分配的服务，能够依照各种商业需要，对云、边缘、终端进行有效的分布，以实现存储、运算以及网络资源的高效管理。网络发展的新趋势是网络和计算融合，企业和个人客户不仅需要网络和云，还必须灵活地将计算任务分配到恰当的位置<sup>[8]</sup>。为了满足新一代网络服

务的业务需求、动态配置计算资源的轻量化要求，业界提出了算力网络的理念。在6G时代，网络中以算力为核心的服务将无处不在，网络将不再仅仅进行数据传输服务，而是转变为集存储、计算、通信功能服务为一体的信息系统。

在制定算力网络标准方面，我国已经取得了一定进展。在国际电信联盟（ITU）中，SG11和SG13研究组已经成功设立了Y.CPN、Y.CAN和Q.CPN等系列标准，互联网工程任务组（IETF）进行了计算优先网络框架（CNF）等系列标准的研究。2019年10月，中国电信研究院在ITU成功立项“算力网络框架与架构标准”（Y.2501），这是算力网络领域首个设立的国际标准，用于规范算力网络的框架和架构制定。2021年7月，ITU正式批准了Y.2501标准，为算力网络研究打下了坚实的基础。算力网络标准作为我国的原创性成果，正为相关国际研究提供参考。

未来，泛在连接、泛在计算、区块链与数字孪生网络等与6G的融合应用，都以强大的算力为基础。各行业产生大量的数据，数据的处理则需要充分的计算能力，计算能力将成为智能的基本平台<sup>[9]</sup>。算力网络将是6G发展的内在需求，也是6G的预期关键技术之一，相应标准化将成为我国在国际6G标准化发展过程中的竞争优势。

#### （二）区块链标准化进程

区块链实际上是一个开放的数据库，通常部署在点到点传输的网络中，用于维护不可变的分布式账本。在区块链中，所有的主体都可以通过分布式的手段来安全地完成注册和更新交易，而交易的数据则由所有的网络参与者一起负责管理，无需依赖第三方中介。区块链技术具有无中心控制、公开、无法修改、可回溯以及隐私保护等特点<sup>[10]</sup>，目前在金融、运输、医疗、制造业、电子政务、智能城市等领域得到了大规模应用。在各国竞相研发6G技术的过程中，区块链技术有望发挥重要作用。

我国积极参与区块链的标准制定。《区块链系统的数据格式标准》（IEEE Standard for Data Format for Blockchain Systems）已由中国电子技术标准化研究院公布，标准号为IEEE 2418.2—2020，涵盖了分布式账本技术与区块链相关的数据元素特性、数据构造、数据分类以及数据标准。2022年，

中国信息通信研究院主导的两项区块链国际标准已经成功完成。ITU-TF.751.6标准即分布式账本技术平台性能评测方法，确定了区块链性能评估的详细规定，明确了性能评估的标准和计算方式，规定了性能测试的操作步骤以及性能测试报告的生成标准；ITU-TF.751.7标准即分布式账本技术平台的功能评估方法，规范了区块链平台的基础功能，提出了准确可行的检验手段和实践案例。ITU-T的区块链国际标准体系受益于这两个标准，标志着我国的区块链评估方法达到了国际先进水平。

基于独特的技术特性，区块链能够提升6G网络的数据隐私性和安全可追溯性。未来，6G将融入人工智能、云端计算、边缘计算、大数据等前沿技术，以达到跨领域的深入连接和交流。这些新兴技术的引入也将会带来新的性能和安全问题，如边缘计算所采用的分布式架构导致计算任务很可能受到恶意攻击，人工智能也存在着数据和模型被窃取的风险<sup>[11]</sup>。因此，6G技术的安全问题也将是标准技术研究的重点，而区块链的技术特点也有助于解决6G网络中的安全性问题，已制定的区块链技术标准将为我国6G标准制定提供支持。

### （三）数字孪生标准化进程

数字孪生是一种旨在精确反映物理对象的虚拟模型，通过感知和采集物理世界中的实体信息进行建模，将物理模型映射到虚拟数字世界中，通过模拟计算物理世界的实际运作，展现对应实体的全生命周期，还可借助数字化的方式来预测并介入未来。在大型、复杂项目中，数字孪生的应用表现出色，可以有效地简化操作流程，提高工作效率。随着6G技术的普及，6G将为数字孪生提供更高的传输速率、更低的时延、更大的连接规模，从而更好应对复杂的应用场景（如数字孪生城市）。

2020年11月，国际标准化组织（ISO）/国际电工委员会（IEC）第一联合技术委员会、物联网和数字孪生分技术委员会的数字孪生工作组（SC 41/WG 6）正式成立，主要职责是推动数字孪生的全球标准化进程。为了促进数字孪生技术的应用和发展，国内各组织已陆续建立数字孪生工作组，如全国信息安全标准化技术委员会、全国通信标准化技术委员会、全国智能建筑及居住区数字化标准化技术委员会等都成立了数字孪生工作组，旨在加

强数字孪生科学规范设计与应用普及。数字孪生工作委员会由中国信息通信研究院、中国互联网协会联合创立，启动了团体标准的制定过程，成为加快数字孪生标准化进程的重要驱动力<sup>[12]</sup>。

在未来的6G时代，数字孪生技术的运用将驱动人类进入充满虚拟元素的数字世界。数字孪生将在工/农业、医疗、城市管理等领域得到广泛应用，这些应用依赖具备微秒级的极低时延特性、超高速的传输效率、万亿数量级的设备互联网络<sup>[13]</sup>。数字孪生会对6G标准的制定起到一定的参考作用，加快我国数字孪生标准制定并申请国际标准有助于巩固我国6G标准化的优势。

### （四）人工智能标准化进程

人工智能技术在通信领域的应用，将促进网络技术的显著发展。在通信领域，人工智能在智能调度、网络状态跟踪、信号优化与智能信号生成处理等方面都得到了广泛应用<sup>[14]</sup>，有助于推动未来通信范式的演变和网络架构的变革。通过移动通信基站、智能设备、边缘服务器等基础设施的广泛部署，移动通信网络将带来更高效的数据传输及更大的网络带宽，也为移动分布式和协作式的人工智能技术应用提供更优越的条件。

人工智能的运用涵盖了多个学科和行业，全球三大标准化机构都参与了人工智能的相关规范制定。ISO主要关注智能金融、自动驾驶、工业机器人等方面。IEC则专注于可穿戴设备的研究和开发。ITU已经陆续针对机器学习、人工智能、物联网等设立了一系列的标准与规范。截至2020年，ISO/IEC设立的联合技术委员会/子委员会42（JTC1/SC42）完成了3项标准化工作，正在开展11项标准项目。电气与电子工程师协会（IEEE）于2016年发布了一系列规范文件，旨在对人工智能系统进行人类社会准则和价值倾向评定并以此形成规范准则。我国编制了《人工智能标准化白皮书（2021版）》，用于指导人工智能标准化方面的研究。

人工智能应用的核心在于利用不断提升的计算能力，深度发掘大数据的潜力并进行持久学习。在6G时代，网络将以智能为基础，达到自我学习、自我操作、自我维护的目标，从而适应各种实时变化<sup>[15-18]</sup>。6G将通过人工智能为整个社会持续地赋能和赋智，实现普惠智能的目标。

### （五）全息通信标准化进程

随着6G网络的发展、终端设备分辨率的提升，即全息通信（3D通信）成为可能，将超越语音、图像、视频等2D通信。全息通信通过实时采集、传输、渲染等方式，自然还原多维信息，将物质世界中距离遥远的实体信息通过数据传输通道建立起全息影像连接，实现网络与真实环境的融合。该技术将广泛应用于影音渲染、远程医疗、教育产业、工业生产、企业管理等，有助于各领域数字化转型和升级。

实现高分辨率、大尺寸的实时交互式全息显示，需要网络具备高效的全息影像传递功能以及先进的三维立体展现技术。这对信息通信系统提出了更高的要求，该系统必须具备处理千位级别以上并发数据流的能力，相应的用户吞吐量可达太比特量级<sup>[16,17]</sup>。在工业、医疗等特殊环境中，全息通信对于数据传输所需的性能提出了更高的要求，即拥有更快的传输速度、更低的延迟、更强的稳定性、更高的准确性。在6G时代，相关技术标准将更完善，可为6G标准发展提供新思路。

## 四、6G关键技术标准的超前布局

在6G关键技术研制上，我国仍需巩固5G发展优势，积极抢占6G标准化的领先地位；存在着潜在关键技术储备不足、关键技术理论创新尚需突破、研究计划尚不完善等问题和挑战。针对太赫兹、智能超表面、智能全息无线电、超大规模多入多出（MIMO）、通信感知一体化等6G关键技术的研究迫在眉睫，亟需超前布局。

### （一）太赫兹技术

太赫兹指0.1~10 THz的电磁波频段，频率比5G更高，包括毫米波、亚毫米波至远红外波等波段。国际5G主流频段是3~6 GHz的毫米波频段，低频段的毫米波已经实现工程化并逐渐商业化，频率更高的光通信也经历了数十年的发展。但是在毫米波、微波等电学频段与红外光、可见光等光学频段之间，还有一段未被有效利用的频段，即太赫兹频段<sup>[18,19]</sup>。

太赫兹在通信领域中具有突出的优势。与毫米波相比，太赫兹在带宽方面比毫米波更具优势，理

论上是5G的10~100倍，无线传输数据率可以远超100 Gbit/s。与光通信相比，太赫兹波受环境光源的干扰小，传输的可靠性与有效性更高，允许非视距传输，在霾、粉尘、紊流等一系列恶劣环境因素影响下仍具有良好表现。此外，太赫兹信号的链路方向性更高，被窃听的风险更低，安全性也更高。太赫兹技术在6G发展中具有良好的应用前景。

### （二）智能超表面技术

智能超表面技术指利用人为编码控制对电磁波信号进行智能调控的一种技术。通过调节电磁波的振幅和波长等信号输入，创造出可控的电磁场，从而提供现实物质世界与数字世界之间的通道。该技术通过调控无线信号传播，打破无线信道不可控特性，进行三维空间中信号传播方向的调控和干扰抑制，提升信号的强度和质量<sup>[18]</sup>。

智能超表面技术具有高性能、高效率、易推广等特点<sup>[20]</sup>，适用于扩展覆盖范围、抑制电磁干扰、提升传输自由度、解决无线通信中的覆盖空洞问题、支持大规模连接、实现高精度定位感知等典型应用。智能超表面技术还能与多技术融合，具有极大的应用潜力，是实现未来通信感知一体化的关键技术；支持创建智能化的无线环境，引领新一代网络技术更新，以快速适应不断增长的移动通信需求。

### （三）智能全息无线电技术

智能全息无线电技术在6G关键技术布局中也是重要方面，基于电磁波的全息干涉原理，对电磁空间进行动态重构和实时准确控制，实现射频全息到光学全息的映射<sup>[21]</sup>。

智能全息无线电技术可应用于多个领域。在无线接入方面，能够实现比传统技术更高的容量和更低的时延，如在高速列车、机场等场景中提供稳定可靠的高速无线网络服务。在智能工厂条件下，支持具有极大流量密度的无线工业通信系统，为工厂的自动化生产提供更加高效、智能的解决方案。在物联网领域，可为物联网终端设备提供精确导航定位、无线远距离快充等服务，为智慧城市建设提供有力支持。智能全息无线电还可以通过无线通信特性实现可视成像和环境感知，准确构建多变的通信环境，为电磁空间智能控制提供支持；基于微波光子天线阵列的相干光上变频，可实现信号的超高相

干性和高并行性，有利于信号直接在光域进行处理和计算，解决相关系统的功耗和时延问题。智能全息无线电技术作者6G物理层备选技术，将是6G标准制定的关键内容之一。

### （四）超大规模MIMO技术

超大规模MIMO技术通过增加天线数量、优化接收机算法来提高系统容量和频谱效率。得益于芯片和天线集成度的升级，大规模天线阵列的应用更为深入。引入新的材料、技术和功能后，超大规模MIMO技术可以利用更丰富的频段资源，实现更高效的频谱利用、更高的定位精度与能量效率、更全面灵活的网络覆盖范围及模式<sup>[22]</sup>。

超大规模MIMO具备波束调整的能力，可提供地面覆盖和非地面覆盖。未来超大规模MIMO将与环境更好地融合，从而实现网络覆盖、多用户容量等指标的大幅提高。分布式超大规模MIMO有利于构造超大规模的天线阵列，网络架构趋近于无定形网络，有利于获得均匀一致的用户体验、更高的频谱效率、更低的系统传输能耗。超大规模MIMO阵列具有极高的空间分辨力，能在复杂的无线通信环境中实现精准的三维定位。该技术的超高处理增益能有效补偿高频段的路径损耗，在原有发射功率的条件下提升高频段的通信距离和覆盖范围。引入人工智能后，可在信道探测、波束管理、用户检测等多个环节实现智能化。超大规模MIMO阵列将成倍提高6G频谱效率，显著增强6G的空间分辨能力。

### （五）通信感知一体化

在信息实际处理过程中，同步实现感知和通信功能的通信技术被称为通信感知一体化技术，可通过软硬件资源或信息共享实现协同工作，有效提升硬件效率、信息处理效率、系统频谱效率。相应设计理念就是将无线通信和感知功能在同一系统中实现并融合共生。通信系统借助硬件或信号处理部分来执行各种感知服务，感知结果协助通信的连接和控制以增强通信效能和服务质量<sup>[23]</sup>。

在未来的6G网络中，通信和感知功能将使无线系统具有感知物理世界的能力，利用感应器传输的通信信号实现感知功能，如目标的检测、定位、识别、成像等。无线系统通过感知功能可以获取周

边环境信息、高效分配通信资源、大幅提高通信效率，从而优化用户终端使用场景并提升用户体验。使用更高频段的频谱（如毫米波、太赫兹波）将进一步增强无线系统的周围环境信息获取能力，提高系统性能并创造更多应用。

## 五、6G 标准化进程的发展建议

### （一）加强6G关键技术自主创新，推动6G基础产业自主发展

在6G关键技术研究方面，我国与发达国家之间还有一定的差距。在6G的激烈竞争中，新一轮技术革新和产业转型显得尤为关键。建议积极推动太赫兹、超大规模MIMO、智能超表面等6G关键技术研究，鼓励高校、企业、科研院所深入参与。未来6G发展需要打破发达国家的技术和标准垄断，推动6G产业基础发展，可在政策层面强化对半导体材料、核心元器件等基础产业的支持力度，为6G关键技术和标准化发展筑牢产业基础。

### （二）加快跨领域协同合作创新，制定6G关键技术标准体系

6G将在工业、农业、医疗、城市管理等领域进行深入应用。应加强跨行业、跨领域的协作，推动产业链上、下游协同创新，可采取设立研究中心、共同参与重大科技项目研发、组织行业联盟等途径，有效汇聚各方力量。在此基础上，积累6G实际生产经验，共同推动6G核心技术探索与标准制定。6G技术将在区块链、全息通信、算力网络、人工智能、数字孪生等新场景技术支持下发挥重要作用，而这些新场景技术的标准化进程也将反向推动6G关键技术标准的制定。

### （三）深化6G技术国际合作，构建开放共赢全球产业生态

在6G研发过程中，仅依靠国内的力量可能存在被孤立和边缘化的风险。我国应团结各方力量，达成共识、深化合作，形成统一标准，确立合作伙伴关系。国内的科研院所、高校、企业可积极参与3GPP、ITU等国际组织，在6G技术、规范、行业应用等方向开展民间合作，追求6G的全球统一标准和建设生态。在此基础上，我国积极扩大6G国

际交流中的影响力, 进一步增进国际层面的协作, 有效探索 6G 技术在欧洲、美国、日本、韩国等国家和地区的联合应用, 以此促进 6G 行业的创新发展, 构建共同发展、合作开放的 6G 全球产业环境。

#### 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:** October 8, 2023; **Revised date:** November 10, 2023

**Corresponding author:** Quan Wei is a professor from the School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. His major research field is new network architecture. E-mail: weiquan@bjtu.edu.cn

**Funding project:** The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022YJS004); Chinese Academy of Engineering project “Research on Double Cycle Development Strategy of Digital Economy Driven by 6G” (2022-XBZD-03); China Postdoctoral Science Foundation (2023M730206)

#### 参考文献

- [1] 中国政府网. 国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知 [EB/OL]. (2022-01-12)[2023-03-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content\\_5667817.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817.htm).  
China Government Network. Notice of the State Council on the issuance of the “14th Five-Year Plan” for the development of the digital economy [EB/OL]. (2022-01-12)[2023-03-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content\\_5667817.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817.htm).
- [2] 中国电子信息产业发展研究院. 6G 全球进展与发展展望白皮书 [R]. 北京: 中国电子信息产业发展研究院, 2021.  
China Center for Information Industry Development. White paper on 6G global progress and development outlook [R]. Beijing: China Center for Information Industry Development, 2021.
- [3] 王亦菲, 闻立群, 李明豫. 全球 6G 产业及政策进展研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2022 (9): 71–75.  
Wang Y F, Wen L Q, Li M Y. Global 6G industry and policy progress [J]. Information and Communication Technology and Policy, 2022 (9): 71–75.
- [4] 刘珊, 黄蓉, 王友祥. 全球 6G 研究发展综述 [J]. 邮电设计技术, 2021 (3): 16–20.  
Liu S, Huang R, Wang Y X. Global 6G research development review [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021 (3): 16–20.
- [5] 陈奕彤, 宋微, 李彩霞. 韩国 6G 研发促进战略研究 [J]. 全球科技经济瞭望, 2021 (8): 20–26.  
Chen Y T, Song W, Li C X. A study on 6G R&D promotion strategy in Korea [J]. Global Science and Technology Economic Outlook, 2021, 36(8): 20–26.
- [6] 徐晓燕, 韩凯峰, 杜煜, 等. 6G 愿景及潜在关键技术分析 [J]. 信息通信技术与政策, 2022 (9): 2–8.  
Xu X Y, Han K F, Du Y, et al. 6G vision and analysis of potential key technologies [J]. Information and Communication Technology and Policy, 2022 (9): 2–8.
- [7] 李鑫阳. 展望全球 6G 发展趋势 [J]. 中国电信业, 2022, 264(12): 26–29.  
Li X Y. Outlook of global 6G development trend [J]. China Telecom Industry, 2022, 264(12): 26–29.
- [8] 何涛, 杨振东, 曹畅, 等. 算力网络发展中的若干关键技术问题分析 [J]. 电信科学, 2022, 38(6): 62–70.  
He T, Yang Z D, Cao C, et al. Analysis of some key technical issues in the development of arithmetic networks [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 62–70.
- [9] 唐雄燕, 曹畅, 王友祥, 等. 算力网络: 面向 6G 要求的计算与网络融合的架构 [J]. 中国通信, 2021, 18(2): 175–185.  
Tang X Y, Cao C, Wang Y X, et al. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement [J]. China Communications, 2021, 18(2): 175–185.
- [10] 李玉, 段宏岳, 殷昱煜, 等. 基于区块链的去中心化众包技术综述 [J]. 计算机科学, 2021, 48(11): 12–27.  
Li Y, Duan H Y, Yin Y Y, et al. A review of block-chain based decentralized crowdsourcing technologies [J]. Computer Science, 2021, 48(11): 12–27.
- [11] 代玥玥, 张科, 张彦. 区块链赋能 6G [J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 111–120.  
Dai Y Y, Zhang K, Zhang Y. Blockchain-enabled 6G [J]. Journal of Internet of Things, 2020, 4(1): 111–120.
- [12] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市白皮书 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2021.  
China Academy of Information and Communications Technology. White paper on digital twin city [R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2021.
- [13] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 典型场景和关键能力 [R]. 北京: IMT-2030 (6G) 推进组, 2022.  
IMT-2030 (6G). 6G typical scenarios and key capabilities [R]. Beijing: IMT-2030 (6G), 2022.
- [14] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书 (2021 年) [R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2021.  
China Electronics Standardization Institute. White paper on artificial intelligence standardization [R]. Beijing: China Electronics Standardization Institute, 2021.
- [15] 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 for 6G mobile networks [J]. Journal of Communication, 2022, 43(7): 189–202.
- [16] 袁晓志, 彭莉, 张琳峰. 全息通信对未来网络的需求与挑战 [J]. 电信科学, 2020, 36(12): 59–64.  
Yuan X Z, Peng L, Zhang L F. Demands and challenges of holographic communication for future networks [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(12): 59–64.
- [17] 栾宁, 熊轲, 张煜, 等. 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战 [J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 29–43.  
Luan N, Xiong K, Zhang Y, et al. 6G: Typical applications, key technologies and challenges [J]. Journal of Internet of Things, 2022, 6(1): 29–43.
- [18] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书



- [R]. 北京: IMT-2030 (6G)推进组, 2021.  
IMT-2030 (6G). 6G overall vision and potential key technologies white paper [R]. Beijing: IMT-2030 (6G), 2021.
- [19] 冯伟, 韦舒婷, 曹俊诚. 6G技术发展愿景与太赫兹通信 [J]. 物理学报, 2021, 70(24): 175-189.  
Feng W, Wei S T, Cao J C. 6G technology development vision and terahertz communication [J]. Journal of Physics, 2021, 70 (24): 175-189.
- [20] 高子路, 孙韶辉, 李丽. 面向新一代移动通信的智能超表面技术综述 [J]. 电信科学, 2022, 38(10): 20-35.  
Gao Z L, Sun S H, Li L. A review of intelligent supersurface technologies for next-generation mobile communications [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(10): 20-35.
- [21] 潘时龙, 宗柏青, 唐震宙, 等. 面向6G的智能全息无线电 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(1): 1-15.  
Pan S L, Zong B Q, Tang Z Z, et al. Intelligent holographic radio for 6G [J]. Radio Communication Technology, 2022, 48(1): 1-15.
- [22] IMT-2030 (6G)推进组. 超大规模MIMO技术研究报告[R]. 北京: IMT-2030 (6G)推进组, 2022.  
IMT-2030 (6G). Research report on super massive MIMO technology [R]. Beijing: IMT-2030 (6G), 2022.
- [23] 王亚娟, 金婧, 楼梦婷, 等. 通信感知一体化关键技术与应用 [J]. 通信世界, 2022 (21): 27-30.  
Wang Y J, Jin J, Lou M T, et al. Key technology and application of integrated sensing and communication [J]. Communication World, 2022 (21): 27-30.