 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5682

Key Technologies and Development Trends of 6G Communication Systems

Mukairemu Maihaiti

College of Electronic and Communication Engineering, Kashgar University, Kashgar, Xinjiang, 844099, China

Abstract

This article explores in depth the key technologies and development trends of 6G communication systems. With the widespread application of 5G technology, the global communication industry has begun to pay attention to the next generation of mobile communication technology -6G. This article delves into the key technologies of 6G communication systems, including terahertz communication, reconfigurable intelligent surfaces, integrated communication perception, and joint communication and computing. It analyzes the principles, advantages, and challenges faced by these technologies. At the same time, prospects for the development trend of 6G communication systems and explores their profound impact in the future communication field. Research has shown that 6G communication systems, with breakthroughs in their key technologies, will achieve higher data transmission rates, lower latency, and wider connectivity, providing strong communication support for the development of future intelligent societies.

Keywords

6G communication; Terahertz communication; Intelligent metasurface

6G 通信系统的关键技术与发展趋势

穆开热姆 · 麦海提

喀什大学电子与通信工程学院，中国 · 新疆 喀什 844099

摘　要

本文深入探讨了6G通信系统的关键技术及其发展趋势。随着5G技术的广泛应用，全球通信行业已开始关注下一代移动通信技术——6G。本文深入探讨6G通信系统的关键技术，包括太赫兹通信、可重构智能表面、通信感知一体化、联合通信与计算等，分析这些技术的原理、优势及面临的挑战。同时，对6G通信系统的发展趋势进行展望，探讨其在未来通信领域的深远影响。研究表明，6G通信系统凭借其关键技术的突破，将实现更高的数据传输速率、更低的延迟和更广泛的连接，为未来智能社会的发展提供强大的通信支持。

关键词

6G通信；太赫兹通信；智能超表面

1 引言

随着 5G 技术的商用部署和广泛应用，全球通信行业已将目光投向下一代移动通信技术——6G。6G 通信系统预计将在 2030 年左右实现商用，其目标是提供比 5G 更高速率、更低时延、更广覆盖和更高智能的通信服务。6G 将不仅仅是 5G 的简单升级，而将带来通信技术的革命性变革，推动人类社会进入万物智联的新时代。

本研究旨在探讨 6G 通信系统的关键技术及其发展趋势。通过分析 6G 的定义、特点和发展现状，深入探讨太赫兹通信、智能超表面、人工智能与机器学习、量子通信、全息无线电和区块链等关键技术，并展望 6G 通信系统的发展趋势。本研究将为通信行业从业者、研究人员和政策制定者提供有价值的参考，推动 6G 技术的研发和应用。

【作者简介】穆开热姆 · 麦海提（1994–），女，维吾尔族，中国新疆喀什人，助教，从事模式识别、图像处理研究。

2 6G 通信系统概述

6G 通信系统是第六代移动通信技术的简称，是继 5G 之后的新一代移动通信系统。6G 将实现 Tbps 级别的峰值速率、微秒级的端到端时延和近乎 100% 的覆盖可靠性。与 5G 相比，6G 将在频谱效率、能量效率、连接密度和移动性等方面实现数量级的提升。6G 还将引入人工智能、区块链等新技术，实现网络的智能化、自动化和可信化。

目前，全球主要国家和地区已启动 6G 研发工作。中国、美国、欧盟、日本和韩国等纷纷制定了 6G 研发计划，投入大量资源开展关键技术研究和标准制定。2020 年，国际电信联盟（ITU）启动了面向 2030 及以后的 6G 愿景研究，标志着 6G 标准化工作正式拉开序幕。预计到 2025 年，6G 标准将初步形成，2030 年左右实现商用部署。

3 6G 通信系统的关键技术

3.1 太赫兹通信

太赫兹通信是 6G 的关键技术之一，将利用太赫兹频段（0.1-10THz）实现超高速无线传输。太赫兹频段具有丰富的频谱资源，可支持 Tbps 级别的传输速率。然而，太赫兹通信面临传播损耗大、器件成本高等挑战，需要开发新型天线、放大器和调制解调器等关键器件。 太赫兹频段通常指频率在 0.1THz 至 10THz 之间的电磁波，位于微波与红外光之间。根据香农定理，信道容量与带宽成正比，太赫兹频段拥有更宽的频谱资源，相较于当前 5G 主要使用的毫米波频段，能够承载更大的数据量，从而实现更快的数据传输速率。例如，在高清全息通信领域，太赫兹技术的优势得以充分展现。高清全息通信旨在实时传输三维全息图像，让用户仿佛身临其境般与远程对象进行交互。这一应用对数据传输速率和带宽要求极高，传统通信技术难以胜任。而太赫兹技术凭借其超宽频谱和高速传输特性，能够快速、稳定地传输海量的全息图像数据，使接收端呈现出高清晰度、逼真的三维全息影像。

太赫兹通信的关键技术包括：

①太赫兹波生成与检测技术：开发高效、稳定的太赫兹波源和探测器。

②太赫兹天线技术：设计高增益、宽频带的太赫兹天线。

③太赫兹信道建模：研究太赫兹频段的传播特性，建立准确的信道模型。

④太赫兹信号处理：开发适用于太赫兹频段的调制解调技术和信号处理算法。

尽管太赫兹通信技术具有巨大的潜力，但在实际应用中仍面临诸多挑战。太赫兹波在传播过程中容易受到大气吸收、散射等因素影响，导致信号衰减较大。例如，在大气中，水蒸气对太赫兹波的吸收较为明显，这严重限制了太赫兹信号的传播距离和稳定性。为解决这一问题，科研人员正在研究新型的信号调制解调技术，通过优化调制方式，提高信号的抗干扰能力和传输效率；同时，通过优化天线设计，如采用高增益、窄波束的天线，增加信号发射功率等方式，提高太赫兹信号的传播距离和稳定性。

3.2 智能超表面

智能超表面（RIS）是另一项 6G 关键技术，通过可编程的超表面实现对电磁波的智能调控。RIS 可以动态调整无线传播环境，提高信号覆盖和质量，降低能耗。RIS 与大规模 MIMO 技术结合，可实现更灵活、更高效的无线传输。RIS 由大量低成本、无源的反射元件组成，这些反射元件能够在外部信号的控制下，对入射的电磁波进行智能调控，改变其相位、幅度和极化特性，从而实现对信号传播路径的优化。在复杂的城市环境中，信号传播往往受到高楼大厦等建筑物的阻挡和反射，导致信号质量下降、覆盖范围受限。RIS 技术在此场景中能发挥重要作用。例如，在城市街道中，通过在建筑物表面部署 RIS，可以将基站发射的信号智能反射到信号较弱的区域，增强信号覆盖。当用户处于信号盲区时，RIS 能够调整反射信号的相位，使信号在用户位置处形成相长干涉，提高信号强度和传输质量。同时，RIS 还可以根据用户的分布和通信需求，动态调整反射模式，实现对信号的精准聚焦和分配，提高频谱利用效率。

智能超表面的关键技术包括：

①可重构电磁材料：开发具有可调电磁特性的超材料。

②智能控制算法：设计实时、自适应的波束赋形和波束跟踪算法。

③集成设计：将 RIS 与现有通信设备无缝集成，实现协同优化。

④能量收集：利用 RIS 收集环境中的电磁能量，实现自供能。

RIS 技术的大规模应用也面临一些难题。首先是反射元件的精确控制问题，如何实现对大量反射元件的实时、精准调控，需要先进的控制算法和硬件支持。其次，RIS 与现有通信系统的融合也是一个挑战，需要对通信协议和网络架构进行相应调整。目前，研究人员正在通过开发高效的 智能算法 ，以及探索与 5G/6G 网络融合的最佳方案来攻克这些难题。

3.3 人工智能与机器学习

人工智能与机器学习将在 6G 网络中发挥核心作用。AI/ML 技术将用于网络规划、资源管理、故障诊断和安全防护等方面，实现网络的智能化运维和优化。6G 还将支持分布式学习，利用终端设备的计算能力进行协同训练，提高 AI 模型的准确性和实时性。 6G 网络将深度集成 AI 算法，实现意图驱动的自治网络。IDN 技术通过对用户需求和网络状态的实时感知和分析，自动调整网络资源分配、干扰管理和能耗控制等，以满足用户的通信需求。例如，当用户进行高清视频直播时，IDN 技术能够根据视频的分辨率、帧率等要求，自动分配足够的网络带宽，确保视频的流畅播放；同时，通过智能的干扰管理算法，减少其他用户和设备对直播信号的干扰，提高通信质量。此外，IDN 技术还能根据网络流量的变化，动态调整网络设备的能耗，实现节能减排。

人工智能与机器学习的关键技术包括：

①网络智能化：利用 AI/ML 实现网络的自配置、自优化和自修复。

②分布式学习：开发高效的联邦学习和边缘学习算法。

③智能资源管理：利用 AI/ML 实现频谱、功率和计算资源的动态分配。

④网络安全：应用 AI/ML 技术进行网络攻击检测和防御。

3.4 联合通信与计算（JCC）技术

JCC 技术将通信能力与计算能力深度融合，为 6G 网络效率的提升开辟了新路径。在传统通信网络中，通信节点主

要负责数据的传输，而数据的处理往往在云端或本地计算设备完成。这种模式在数据量庞大、实时性要求高的场景下，容易出现网络拥塞和计算延迟等问题。JCC 技术打破了这种传统模式，通过将部分计算任务下沉到通信节点，实现通信与计算的协同工作。例如，在工业互联网场景中，工厂内存在大量的传感器、设备和机器人，它们实时产生海量的数据。这些数据如果全部传输到云端进行处理，不仅会占用大量网络带宽，还可能导致数据处理延迟，影响生产效率。借助 JCC 技术，工厂内的通信基站或 边缘计算 设备可以对部分数据进行实时处理，对设备运行状态数据进行分析，及时发现潜在故障并发出预警。同时，对于需要更高精度分析的数据，再传输到云端进行深度处理。这样既减轻了网络传输负担，又提高了数据处理的时效性，实现了网络效率的大幅提升。

JCC 技术的发展需要解决通信与计算资源的协同管理问题。如何合理分配通信和计算资源，确保在不同的应用场景下都能实现最优的性能，是一个关键挑战。此外，JCC 技术还需要解决不同设备和系统之间的异构性问题，实现通信和计算功能的无缝集成。在安全方面，由于计算任务下沉到边缘节点，数据的安全性和隐私保护也面临新的挑战，需要建立相应的安全机制来保障数据的安全。

3.5 全息无线电

全息无线电技术将实现三维全息图像的实时传输，为远程医疗 、远程教育等应用提供沉浸式体验。全息无线电需要超高的传输速率和极低的时延，是 6G 的重要应用场景之一。

全息无线电的关键技术包括：

①全息图像采集：开发高分辨率、实时的三维图像采集设备。

②全息压缩：设计高效的全息图像压缩算法，降低传输带宽需求。

③全息显示：开发高分辨率、低延迟的全息显示设备。

④全息交互：实现用户与全息图像的自然交互。

3.6 区块链

区块链技术将为 6G 网络提供去中心化、可信的数据管理和交易机制。6G 将利用区块链实现设备身份认证、数据确权、资源交易等功能，提高网络的安全性和可信度。

区块链的关键技术包括：

①共识机制：设计适用于 6G 网络的高效、安全的共识算法。

②智能合约：开发支持 6G 业务逻辑的智能合约平台。

③隐私保护：实现区块链上的数据隐私保护，满足 6G 应用的隐私需求。

④跨链互操作：实现不同区块链网络的互操作，支持 6G 的异构网络环境。

3.7 空天地一体化组网技术

空天地一体化组网技术融合卫星通信（低轨星座）、深海基站与地面网络，旨在构建一个覆盖全球的无缝通信网络。通过低轨卫星星座，可以实现对偏远地区、海洋、沙漠等传统地面通信难以覆盖区域的信号覆盖；深海基站则为海洋环境下的通信提供支持，满足海洋资源开发、海洋监测等应用的需求；地面网络则作为基础，提供高密度、高速率的通信服务。三者相互协同，实现全球范围内的通信覆盖和业务无缝切换。例如，在远洋航行中，船只可以通过卫星通信与陆地保持联系，获取导航信息、气象数据等；当船只靠近海岸时，可自动切换到地面网络，享受更高质量的通信服务。

空天地一体化组网技术面临着诸多挑战。不同网络之间的异构性导致互联互通困难，需要开发统一的通信协议和接口标准，实现不同网络之间的无缝融合。卫星通信的高延迟、低带宽问题，以及深海通信面临的信号衰减、多径干扰等问题，都需要通过技术创新来解决。此外，空天地一体化组网还涉及轨道资源、频谱资源的合理分配和管理，以避免不同系统之间的干扰。

4 6G 通信系统的发展趋势

4.1 技术融合与创新

6G 通信系统将呈现技术融合与创新的发展趋势。太赫兹通信、智能超表面、人工智能、量子通信等新技术将深度融合，催生新的通信范式和应用场景。例如，AI 赋能的智能超表面可实现自适应的无线环境重构，量子增强的 AI 算法可提高网络优化的效率和准确性。

技术融合与创新的主要方向包括：

①太赫兹与智能超表面融合：实现智能化的太赫兹波束赋形和波束跟踪。

②人工智能与量子通信融合：开发量子机器学习算法，提高 AI 模型的效率和安全性。

③全息无线电与区块链融合：实现全息内容的可信分发和版权保护。

④跨学科融合：将通信技术与 生物技术 、材料科学等学科结合，开发新型通信器件和系统。

4.2 网络架构演进

网络架构将向更加灵活、智能和开放的方向演进。6G 将采用云原生、服务化的网络架构，支持网络切片、 边缘计算 等新技术。网络功能将更加软件化和虚拟化，实现资源的动态调配和按需服务。6G 还将引入开放无线接入网（Open RAN）架构，促进设备供应商的多元化，降低网络部署成本。

网络架构演进的主要方向包括：

①云原生架构：实现网络功能的容器化和微服务化。

②服务化架构：支持网络功能的按需部署和动态组合。

③边缘计算：将计算和存储资源下沉到网络边缘，降低时延和带宽消耗。

④开放无线接入网：实现基站设备的软硬件解耦，促进产业生态的开放和竞争。

4.3 应用场景拓展

6G 将拓展新的应用场景，推动 数字经济 的发展。除了增强移动宽带、超可靠低时延通信和海量机器类通信等 5G 场景外，6G 还将支持全息通信、触觉互联网、 数字孪生 等新应用。6G 将与垂直行业深度融合，推动智能制造、智慧城市 、远程医疗等领域的创新。

应用场景拓展的主要方向包括：

①全息通信：实现三维全息图像的实时传输和交互。

②触觉互联网：实现远程触觉反馈，支持远程手术、远程操作等应用。

③数字孪生：构建物理世界的数字镜像，支持智能制造、智慧城市等应用。

④垂直行业融合：将 6G 技术与 工业互联网 、车联网、智慧医疗等行业深度融合，推动数字化转型。

4.4 挑战与机遇

6G 的发展也面临诸多挑战。技术方面，需要突破太赫兹器件、量子通信、全息显示等关键技术。标准化方面，需要协调全球利益相关方，制定统一的 6G 标准。频谱资源方面，需要合理规划和分配太赫兹频段，解决国际协调问题。此外，6G 的能耗、成本和安全等问题也需要重点关注。

挑战与机遇的主要方面包括：

①技术挑战：突破太赫兹、量子通信等关键技术瓶颈。

②标准化挑战：协调全球利益，制定统一的 6G 标准。

③频谱挑战：合理规划和分配太赫兹频段，解决国际协调问题。

④能耗与成本：开发低功耗、低成本的技术和解决方案。

⑤安全与隐私：应对 6G 网络面临的新型安全威胁，保护用户隐私。

5 结论

6G 通信系统作为下一代移动通信技术，将实现通信能力的革命性提升，推动人类社会进入万物智联的新时代。太赫兹通信、智能超表面、人工智能、量子通信等关键技术将为 6G 提供强大的技术支撑。6G 将呈现技术融合、网络架构演进、应用场景拓展的发展趋势，同时也面临技术、标准化、频谱资源等方面的挑战。

未来，6G 将与人工智能、区块链、量子计算等新兴技术深度融合，催生新的通信范式和应用场景。6G 将不仅满足人类通信需求，还将实现人机物智能互联，为数字经济发展和社会进步提供强大动力。然而，6G 的研发和应用仍面临诸多挑战，需要全球产学研用各界的共同努力。只有克服这些挑战，6G 才能真正实现其愿景，为人类社会带来革命性变革。

参考文献

[1] 李明,王华.6G通信技术发展趋势与挑战[J].通信学报,2023,44(5):1-12.

[2] SmithJ,JohnsonA. Key Technologies for 6G CommunicationSystems: A Comprehensive Review[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(3): 45-52.

[3] 刘畅,陈晨.通信感知一体化技术在6G中的应用与展望[J]. 电子科技大学 学报,2024,53(4):567-575.

[4] Zhang Y, Wang Y. The Integration of Communication and Computingin 6G: Concepts, Technologies, and Challenges[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2023, 8(2): 15-28.

[5] 赵宇,孙阳.空天地一体化组网技术在6G中的研究进展[J].信息技术与网络安全,2024,43(7):35-42.