

# 6G 之路：愿景、需求、关键技术及实验平台

## 编作者：

王承祥<sup>1,2,\*</sup>, 尤肖虎<sup>1,2,\*</sup>, 高西奇<sup>1,2</sup>, 朱秀铭<sup>1,2</sup>, 李子昕<sup>1,2</sup>, 张川<sup>1,2</sup>, 王海明<sup>3,2</sup>, 黄永明<sup>1,2</sup>, 陈云飞<sup>4</sup>, Harald Haas<sup>5</sup>, John S. Thompson<sup>6</sup>, Erik G. Larsson<sup>7</sup>, Marco Di Renzo<sup>8</sup>, 童文<sup>9</sup>, 朱佩英<sup>9</sup>, 沈学民<sup>10</sup>, H. Vincent Poor<sup>11</sup>, Lajos Hanzo<sup>12</sup>

## 参与单位：

<sup>1</sup>东南大学，信息科学与工程学院，移动通信全国重点实验室，南京 210096，中国

<sup>2</sup>紫金山实验室，南京 211111，中国

<sup>3</sup>东南大学，信息科学与工程学院，毫米波全国重点实验室，南京 210096，中国

<sup>4</sup>杜伦大学，工程系，杜伦 DH1 3LE，英国

<sup>5</sup>思克莱德大学，电子与电气工程系，Li-Fi 研发中心，格拉斯哥 G1 1XQ，英国

<sup>6</sup>爱丁堡大学，工程学院，数字通信研究所，爱丁堡 EH9 3JL，英国

<sup>7</sup>林雪平大学，电气工程系，林雪平 581 83，瑞典

<sup>8</sup>巴黎萨克雷大学，法国国家科学研究中心，中央电气系统与信号实验室，3 Rue Joliot-Curie, 91192 Gif-surYvette, 法国

<sup>9</sup>加拿大华为技术有限公司，渥太华 K2K 3J1，加拿大

<sup>10</sup>滑铁卢大学，电气与计算机工程系，滑铁卢 ON N2L 3G1，加拿大

<sup>11</sup>普林斯顿大学，电气与计算机工程系，普林斯顿 NJ 08544，美国

<sup>12</sup>南安普敦大学，电子与计算机科学学院，南安普敦 SO17 1BJ，英国

编者注：本文翻译于 C.-X. Wang\*, X. You\*, X. Gao, *et al.*, “On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies and testbeds,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 25, no. 2, pp. 905-974, 2nd Quart., 2023.

# 目录

摘要.....	1
<b>第一章 引言.....</b>	<b>2</b>
1.1 5G 局限性与挑战.....	2
1.2 研究现状.....	4
1.3 本文主要贡献.....	6
<b>第二章 6G 愿景.....</b>	<b>10</b>
2.1 全覆盖.....	11
2.2 全频谱.....	12
2.3 全应用.....	12
2.4 全感官.....	13
2.5 全数字.....	13
2.6 强安全.....	13
2.7 总结.....	14
<b>第三章 6G 技术需求与应用场景 .....</b>	<b>16</b>
3.1 6G 技术需求 .....	16
3.1.1 数据速率&时延 .....	16
3.1.2 容量&覆盖率 .....	18
3.1.3 服务效率.....	19
3.1.4 多元化服务评估.....	19
3.2 6G 应用场景 .....	20
3.2.1 无线数据中心.....	22
3.2.2 触觉互联网.....	23
3.2.3 数字孪生应用.....	23
3.2.4 无线脑机接口应用.....	23
3.2.5 全息通信.....	24
3.2.6 应急救援通信.....	24
3.2.7 沉浸式 XR .....	24
3.3 系统性能分析与 KPIs 折中.....	25
<b>第四章 6G 网络架构.....</b>	<b>28</b>
4.1 5G 网络架构演进.....	28
4.1.1 网络功能虚拟化.....	28

4.1.2 软件定义网络.....	30
4.1.3 基于服务的架构.....	30
4.1.4 网络切片.....	31
4.2 6G 网络架构发展方向.....	32
4.2.1 三维多域融合组网.....	32
4.2.2 安全和可信度.....	33
4.2.3 网络、感知与计算融合.....	34
4.2.4 绿色灵活轻量.....	35
4.2.5 内生 AI 智能化.....	37
4.3 6G 新型网络架构.....	39
<b>第五章 6G 关键技术.....</b>	<b>41</b>
5.1 新频谱.....	42
5.1.1 太赫兹通信.....	42
5.1.2 光无线通信.....	43
5.1.3 频谱管理技术.....	44
5.2 增强空口技术.....	46
5.2.1 新波形和新型调制技术.....	46
5.2.2 新编码技术.....	46
5.2.3 现代随机接入策略.....	47
5.2.4 超大规模 MIMO.....	48
5.2.5 带内全双工技术.....	49
5.3 新物理维度.....	49
5.3.1 轨道角动量.....	50
5.3.2 智能反射面.....	51
5.3.3 全息无线电.....	52
5.4 新能力.....	52
5.4.1 人工智能.....	52
5.4.2 通感一体化.....	53
5.4.3 区块链.....	54
5.4.4 语义通信.....	55
5.4.5 能源中性设计.....	56
<b>第六章 6G 实验平台.....</b>	<b>57</b>
6.1 6G 信道实验平台.....	58
6.1.1 6G 普适信道仿真器.....	58
6.1.2 6G 信道探测器.....	59
6.2 6G 关键技术仿真实验平台.....	63
6.2.1 毫米波.....	64
6.2.2 太赫兹.....	65

6.2.3 可重构智能表面.....	65
6.2.4 ISAC .....	66
6.2.5 无蜂窝网络.....	66
6.2.6 光无线通信.....	67
6.3 6G 系统综合实验平台 .....	68
<b>第七章 6G 未来挑战.....</b>	<b>70</b>
7.1 基础理论研究.....	70
7.1.1 新型信道研究.....	70
7.1.2 电磁信息论.....	71
7.1.3 统一基带处理.....	72
7.1.4 6G 性能指标折中 .....	73
7.2 实现 6G 愿景面临的挑战 .....	73
7.2.1 空天地海一体化网络.....	73
7.2.2 射频/光异构混合网络 .....	73
7.2.3 AI 使能的无线通信网络.....	74
7.2.4 通感算一体化网络.....	74
7.2.5 内生安全网络.....	75
7.2.6 沉浸式交互网络.....	75
7.2.7 数字孪生网络.....	76
7.3 系统研究.....	76
7.3.1 绿色网络.....	76
7.3.2 6G 实验平台 .....	77
<b>第八章 经验教训与总结 .....</b>	<b>78</b>
8.1 经验教训.....	78
8.2 总结.....	79
<b>缩写列表.....</b>	<b>80</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>87</b>

# 摘要

第五代（The fifth generation, 5G）移动通信系统已经进入商用发展阶段，为用户提供全新服务和优质体验，也为各行业带来了新的机遇。然而，5G 仍面临诸多挑战。为了应对这些挑战，国际工业界、学术界和标准化组织已经开始研究第六代（The sixth generation, 6G）无线通信系统。目前已有一系列白皮书和综述论文发布，它们旨在从需求、应用场景、关键技术等方面定义 6G。尽管国际电信联盟（International Telecommunications Union, ITU）一直致力于描摹 6G 愿景，并预计在 2023 年 6 月就什么是 6G 达成共识，但全球的相关讨论依旧处于开放状态，现有的文献已经指出了许多未解决的问题。本文首先对 6G 愿景、技术需求和应用场景进行了全面的描绘，涵盖了当前对 6G 的普遍认识。然后，对 6G 网络架构与关键技术进行了批判性评估。此外，首次详细介绍了现有的实验平台和先进的 6G 验证平台。此外，还明确了未来的研究方向和开放挑战，为正在进行的全球讨论提供新的思路。最后，讨论了迄今为止关于 6G 网络的经验教训。

关键字 —— 6G 愿景、6G 关键性能指标（Key performance indicator, KPI）、6G 应用场景、6G 网络架构、6G 关键技术、6G 实验平台、6G 挑战

# 第一章 引言

随着通信应用的飞速发展，通信技术正在经历一代又一代的巨大变革。迄今为止，蜂窝移动通信系统的发展经历了五代。从第一代（The first generation, 1G）模拟通信系统到第五代（The fifth generation, 5G）数字通信系统，每一代都拥有更高的频率、更大的带宽和更高的数据速率。5G 自 2019 年开始正式商用，其采用 6 GHz 以下和毫米波（Millimeter wave, mmWave）频段，峰值速率达到 20 Gbps。从系统架构的角度来看，移动通信系统正朝着更多天线、更先进的多址技术和更丰富的服务方向发展，如图 1 所示。5G 基站利用大规模多输入多输出（Multiple-input multiple-output, MIMO）<sup>[1]</sup>、毫米波和超密集组网（Ultra-dense networking, UDN）技术<sup>[2]</sup>，支持多达 64 根天线的收发链路。目前配备 128 根天线的商用 5G 基站产品已经成熟，华为率先建立了具有 384 根天线的大规模 MIMO 基站<sup>[3]</sup>。此外，5G 还可以支持增强现实（Augmented reality, AR）、虚拟现实（Virtual reality, VR）和万物互联（Internet of everything, IoE）。

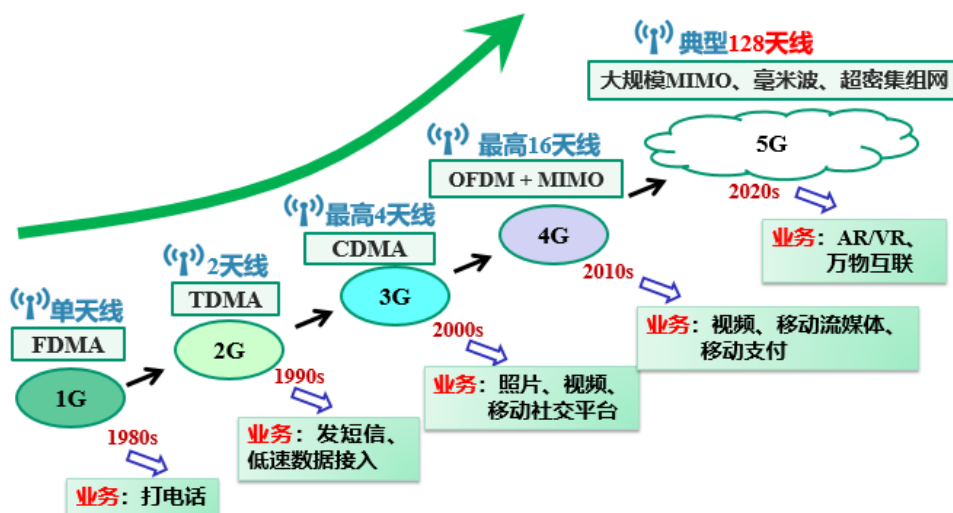


图 1 1G-5G: 天线、多址技术、业务

## 1.1 5G 局限性与挑战

尽管 5G 比第四代（The fourth generation, 4G）通信系统有了显著改进，但它仍然有一些局限性。目前，有许多应用和服务需要更好的超出 5G 能力的通信性能，例如全球覆盖、超高速率传输、超低时延、巨连接、高精度定位、超高可靠、安全连接、低功耗、高能效（Energy efficiency, EE）以及泛在智能。为了突破这些局限性，需要解决几个挑战。需要进一步探索高纬度地区的全球海上通信和卫星通信，实现全球覆盖。超高速率传输需要大幅改进，使得峰值速率达到 Tbps 级别，支撑超高清视频、远程医疗等业务。在低速传输时，端到端（End-to-end, E2E）时延需要小于 1 毫秒，而在高速传输时，时延应达到微秒级。连

接数密度应达到  $10^8$  设备/ $\text{km}^2$ ，满足密集人群和工业设备的连接需求。此外，定位精度有待提升，实现室外厘米级和室内亚厘米级高精度定位。触觉互联网、车联网（Vehicle to everything, V2X）、无线数据中心等一系列新兴应用，对可靠性提出了更高的要求。能耗也是很多应用的关键问题，因此需要降低功耗，将网络能效提高 100 倍。此外，大量的智能化应用促使通信系统具有更高的智能化水平。通过分析 5G 能力与未来需求之间的差距，表 1 总结了 5G 的局限性和挑战，这些局限性和挑战有望在第六代（The sixth generation, 6G）通信系统中得到探索 and 解决。后面会详细分析介绍 5G 和 6G 的关键性能指标（Key performance indicator, KPI）。

表 1 5G 局限性与挑战总结

关键指标	主要行业应用	行业需求	5G 指标	未来研究挑战
全球覆盖	海洋通信 卫星通信	海洋、偏远陆地全覆盖	海洋覆盖率为 5% 陆地覆盖率为 20%	空天地海全覆盖
传输速率	超高清视频 全息影像	需要超高速率传输	传输速率最高达 20 Gbps，用户体验速率约为 0.1 Gbps	峰值数据速率达 Tbps，用户体验速率达 1-10 Gbps
超低时延	自动驾驶 高精度工业生产	高速低时延传输	静止和低速下端到端时延小于 1 ms，高速下无法达到该时延	缩减至亚毫秒级（ $<1\text{ms}$ ）甚至是微秒级（ $\mu\text{s}$ ）
连接数密度	密集商场、 车站等 全自动生产线	满足超密人口 超密设备	$10^6/\text{km}^2$	达到 $10^8/\text{km}^2$ 的连接数密度
高精度定位	无人车定位 导航 室内精确定位	满足任何情况下的室外室内精确定位	室外约 10 米 室内约 1 米	期望达到室外米级，室内厘米级的高精度定位

高可靠/ 安全	触觉互联网、车联网、远程医疗、无线数据中心、无线脑机接口	超高可靠/安全	可靠性：99.999%	可靠性： 99.99999%
低功耗/ 高效能	生物纳米物联网、空中通信	尽可能降低功耗、提升网络能效	网络能效： $10^7$ bit/J	提升网络能效 100 倍： $10^9$ bit/J
泛在智能	数字孪生、通感一体化、AI 智能应用	支撑一系列智能化应用	智能化水平低	智能化水平高

## 1.2 研究现状

无线通信系统的演进大致是每十年一代的迭代过程。目前，6G 研究正处于早期探索阶段，全球多个国家和标准化组织纷纷公布了 6G 研究计划。2018 年，芬兰政府启动了全球首个大型 6G 研究计划。美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission，FCC）于 2019 年 3 月开放太赫兹（Terahertz，THz）频谱用于 6G 研究，并提出基于“毫米波+太赫兹+卫星”发展 6G 的构想。2020 年 10 月，电信行业解决方案联盟（Alliance for Telecommunications Industry Solutions，ATIS）牵头成立了 NextG 联盟，NextG 联盟是专门管理北美 6G 发展的行业组织。中国科技部于 2019 年 11 月正式启动 6G 研究，成立了国际移动通信 2030（International Mobile Telecommunications 2030，IMT-2030）推进组，推进 6G 技术研究。2020 年 4 月，日本总务省发布了日本 6G 战略规划。韩国 2020 年 1 月发布 6G 时间表，预计 2028 年商用。2021 年 4 月，德国宣布投资 6G 研究，包括 6G Research Hub 和 6G Platform。在欧洲，6G 智能网络和服务行业协会（6G Smart Networks and Services Industry Association，6G-IA）已经成立，致力于下一代网络和服务。作为国际标准化组织，国际电信联盟（International Telecommunications Union，ITU）于 2020 年 2 月发布了 6G 研究的初步时间表，6G 愿景及相应技术提案的研究预计在 2023 年完成。正如表 2 所示，一系列聚焦于下一代无线网络的开创性项目已在全球范围内启动。



表 2 6G 研发项目总结

引文	年份	国家/国际组织	6G 项目
[4]	2018	芬兰	支持 6G 的无线智能社会和生态系统
[5]	2019	中国	集成 5G/6G 的卫星通信技术
[6]	2019	欧盟	5G-LTE 下的人工智能辅助 D 波段网络研究
[7]	2020	中国	超宽带光子太赫兹无线传输理论与关键技术研究
[8]	2020	日本	面向 B5G 的卫星-地面一体化技术研发
[9]	2021	中国	6G 通感算融合网络架构与关键技术
[9]	2021	中国	6G 超低时延超高可靠大规模无线传输技术
[10]	2021	德国	“SENTINEL”项目：包括非地面网络、太赫兹、本地化等的 6G 网络技术
[11]	2021	欧盟	适用于 6G 无线网络的 可重构智能 可持续环境设计
[12]	2021	欧盟	“REINDEER”项目：智能连接平台，打造超多元
[13]	2021	欧盟	“Hexa-X”项目：研究 6G 愿景和连接人类、物理和数字世界的智能技术结构
[14]	2021	美国	可置换和智能下一代系统 (RINGS)
[15]	2022	中国	AI 驱动的 6G 无线智能空口传输技术
[15]	2022	中国	面向 6G 的智简网络架构和自治技术
[15]	2022	中国	面向 6G 的内生安全和隐私保护技术
[15]	2022	中国	面向 6G 智能应用的新网络架构和传输方式
[16]	2022	韩国	用于航空航天和空间应用的量子密码通信
[17]	2022	德国	Open6GHub 项目：面向社会和可持续发展，包括自适应 6G RAN 技术、互联智能等
[18]	2022	欧盟	6GStart：启动欧洲可持续 6G SNS 计划
[19]	2022	欧盟	6GTandem 项目：用于双频分布式 MIMO 技术
[20]	2023-	欧盟	Hexa-X-II 项目：应对可持续性、包容性和可信度方面的挑战
[21]	2023-	欧盟	TERAhertz 集成系统：支持 6G Tbps 的超大规模 MIMO 无线网络 (TERA6G)

在上述计划下，6G 的前期工作正在积极开展。一系列白皮书和相关调研报告已经发布，定义了 6G 设想的需求、应用场景、关键性能指标，讨论了网络架构和关键使能技术等。例如，芬兰的 6G 旗舰组织于 2019 年 9 月发布了第一份 6G 白皮书<sup>[4]</sup>，提出了“泛在无线智能”的愿景，并聚焦 6G 的关键驱动因素、挑战和相关研究问题。之后，它还发布了一系列白皮书<sup>[22]</sup>，涵盖了 6G 组网、机器学习 (Machine learning, ML) 应用、业务、边缘智能、安全等方面。在文献[23]中，罗德施瓦茨 (Rohde & Schwarz) 发布了一份白皮书，探索 5G 到 6G 的演进并预测 6G 关键技术。在文献[24]中，爱立信重点关注人工智能 (Artificial

intelligence, AI) 在下一代智能网络中的重要作用, 确定了 AI 在 6G 中应用的五个挑战。中国电子信息产业发展研究院 (China Center for Information Industry Development, CCID) 于 2020 年 3 月率先发布了 6G 概念和愿景白皮书<sup>[25]</sup>, 并于 2021 年 4 月对全球 6G 进展和发展前景进行了调研<sup>[26]</sup>。此外, 华为<sup>[27]</sup>、中国移动<sup>[28]</sup>、中国联通<sup>[29]</sup>、紫光展锐<sup>[30]</sup>、大唐移动<sup>[31]</sup>也开展了一系列 6G 前期研究项目。中国 IMT-2030 推进组发布了 6G 白皮书, 定义了 6G 的业务场景和潜在关键技术<sup>[32]</sup>, 以及典型应用和 KPI<sup>[33]</sup>。在文献[34]中, NTT DOCOMO 对 5G 的进一步演进和 6G 的需求、用例和相关技术进行了研究, 指出移动通信系统的技术每十年发生一次变化, 移动通信业务市场创造新价值的周期大约是 20 年。在文献[35]中, 三星设想 6G 将通过人与万物之间的超连接为用户提供终极体验。此外, 通信行业的多个联盟也开展了 6G 的早期工作。下一代移动网络联盟 (Next Generation Mobile Networks, NGMN) 从社会目标、市场预期和需求等方面分析了 6G 的驱动因素, 并从 6G 愿景的角度讨论了从 5G 到 6G 的演进路线<sup>[36]</sup>。5G 基础设施协会 (5G Infrastructure Association, 5GIA) 发布白皮书<sup>[37]</sup>, 在驱动力、必要性、关键技术、架构等方面对 6G 充满期待。此外, 6G 网络人工智能联盟 (6G Alliance of Network AI, 6GANA) 一直在积极探索网络人工智能的实现和内生智能 6G 网络的建设<sup>[38]</sup>。同时, 还有大量的 6G 综述论文<sup>[39]-[60]</sup>, 从愿景、需求、用例和关键技术等不同角度对 6G 进行了展望。这些具有前瞻性的 6G 调研工作也激发了针对潜在 6G 技术的各种研究。

### 1.3 本文主要贡献

随着移动通信的快速发展, 我们迫切需要解决 5G 的局限性, 并继续发展 6G。基于已有的一系列 6G 前瞻性工作, 本文对 6G 进行了全面的探讨和总结, 旨在提出更全面的 6G 定义, 涵盖目前对 6G 的普遍理解, 并全面综述 6G 的最新发展。本综述与现有 6G 综述论文相比, 创新点和贡献总结如下:

- 1) 对全球 6G 愿景、技术需求、应用场景进行了全面的描绘, 涵盖了当前业界对 6G 的普遍认识;
- 2) 全面综述了 6G 网络架构和关键技术的发展趋势、研究现状以及标准化进展, 还提出了一种综合的 6G 网络架构;
- 3) 至关重要的是, 首次对现有的 6G 实验平台进行了调研总结, 包含 6G 无线信道实验平台、6G 关键技术仿真实验平台以及 6G 系统综合实验平台;
- 4) 从全球 6G 愿景出发, 讨论了 6G 的一系列开放研究方向和主要挑战, 并总结了从大量文献批判性评估中吸取的经验教训。

表 3 现有 6G 综述论文的比较

引文	年份	覆盖范围						
		愿景	KPI	应用场景	网络架构	关键技术	实验平台	挑战
T. Huang 等人 <sup>[39]</sup>	2019	○			√	√		△
L. Zhang 等人 <sup>[40]</sup>	2019	√		△		√		△
Z. Zhang 等人 <sup>[41]</sup>	2019	√	√	△	√	√		△
B. Zong 等人 <sup>[42]</sup>	2019	√		△	√	√		△
M. Z. Chowdhury 等人 <sup>[43]</sup>	2020	○		√	△	√		√
L. U. Khan 等人 <sup>[44]</sup>	2020	○	√	√	△	√		√
G. Gui 等人 <sup>[45]</sup>	2020	○	√		√	√		√
L. Bariah 等人 <sup>[46]</sup>	2020	√		△		√		√
W. Saad 等人 <sup>[47]</sup>	2020	√	√	√	△	√		√
H. Viswanathan 等人 <sup>[48]</sup>	2020	√	√	△	√	√		△
M. Giordani 等人 <sup>[49]</sup>	2020	○		√	√	√		△
G. Liu 等人 <sup>[50]</sup>	2020	√	√	√	√			△
S. Chen 等人 <sup>[51]</sup>	2020	√	√	△	√	√		△
X.-H. You 等人 <sup>[52]</sup>	2021	√	√	√	√	√		△
J. R. Bhat 等人 <sup>[53]</sup>	2021	○	√	√	√	√		√
W. Jiang 等人 <sup>[54]</sup>	2021	√	√	√	△	√		△

C. D. Alwis 等人 <sup>[56]</sup>	2021	○	√	√	△	√		√
H. Tataria 等人 <sup>[57]</sup>	2021	○	√	√	√	√		△
D. C. Nguyen 等人 <sup>[58]</sup>	2022	○	√	√		√		√
Z. Wang 等人 <sup>[59]</sup>	2022	√		√		√		△
X. Shen 等人 <sup>[60]</sup>	2022	○			√	√		√
本文	2022	√	√	√	√	√	√	√

**注意:**

1. 对于愿景一列，“√”符号表示在参考文献中提出了 6G 总体愿景，“○”符号表示作者在参考文献中展示了他们对 6G 的几个方面的展望，但在参考文献中缺少 6G 总体愿景。
2. 对于其他列，“√”符号表示该方面在参考文献中被详细提及，“△”符号表示该方面在参考文献中仅被简要提及或与其他内容一起而未在某一节中被全面讨论，空白表示该方面在参考文献中完全未被提及。

综述的其余部分基于 600 多个权威引用和总结表格，以概述各种最新技术的方式进行组织。随后，我们确定了一些关键的认知差距。最后，对现有概念的优缺点和它们之间的权衡进行批判性评估，为通过一系列途径解决这些开放性研究问题铺平道路、清除障碍。

图 2 展示了这篇综述论文的架构。为了进一步阐述上述思想，第二章介绍了 6G 愿景并将其与相关论文进行了比较，揭示了本文提出的新兴 6G 愿景的全面性。第三章详细介绍了 6G 的 KPI 和应用场景，并讨论了这些 6G KPI 与关键应用场景之间的关系，以及 6G KPI 之间不可避免的权衡。在第四章中，仔细研究了 6G 网络架构的演进，并提出了一种新颖的 6G 网络架构。第五章从四个角度介绍了所有 6G 关键使能技术。第六章首先总结了 6G 网络架构和关键技术的标准化进展。该论文的一个独特之处在于，在第六章中，研究了开创性的 6G 无线信道实验平台、6G 关键技术仿真实验平台和 6G 系统综合实验验证平台。第七章概述了实现 6G 愿景的未来研究方向和挑战。最后，第八章提供了从对文献的批判性评价中吸取的主要经验教训和结论。

<b>第一章 引言</b>
— 1.1 5G局限性与挑战
— 1.2 研究现状
— 1.3 本文主要贡献
<b>第二章 6G 愿景</b>
— 2.1 全覆盖
— 2.2 全频谱
— 2.3 全应用
— 2.4 全感官
— 2.5 全数字
— 2.6 强安全
— 2.7 总结
<b>第三章 6G 技术需求与应用场景</b>
— 3.1 6G 技术需求
— 3.2 6G 应用场景
— 3.3 系统性能分析与KPI折中
<b>第四章 6G 网络架构</b>
— 4.1 5G 网络架构演进
— 4.2 6G 网络架构发展方向
— 4.3 6G 新型网络架构
<b>第五章 6G关键技术</b>
— 5.1 新频谱
— 5.2 增强空口技术
— 5.3 新物理维度
— 5.4 新能力
<b>第六章 6G 实验平台</b>
— 6.1 6G 信道实验平台
— 6.2 6G 关键技术仿真实验平台
— 6.3 6G 系统综合实验平台
<b>第七章 6G 未来挑战</b>
— 7.1 基础理论研究
— 7.2 实现 6G 愿景面临的挑战
— 7.3 系统研究
<b>第八章 经验教训与总结</b>
— 8.1 经验教训
— 8.2 总结

图 2 综述行文架构

## 第二章 6G 愿景

6G 预计将在几个方面区别于 5G。从应用需求来看, 5G 将 4G 中的“移动互联网”延伸到了“万物互联”。6G 以 5G 为基础, 将继续增强移动互联网和万物互联, 也将与人工智能、大数据深度融合, 实现万物智联。在技术需求方面, 与 5G 相比, 6G 将追求更广的覆盖、更高的速率、更多的连接、超低时延、超高定位精度、通信感知一体化、更加智能、更加安全、更好的可持续性。6G 将是一个超越通信的网络。这些应用需求和技术需求让我们畅想 6G 会是什么样子。

虽然 5G 正在全球范围内推广, 但许多研究计划已经提出了 6G 愿景的看法。2019 年 9 月, 以芬兰奥卢大学为首的 6G 旗舰组织发布了全球首份 6G 研究白皮书, 提出了 6G“泛在无线智能”的愿景<sup>[4]</sup>。2020 年 3 月, CCID 发布的 6G 概念与愿景白皮书设想 6G 打通虚拟世界与现实世界泛在智能连接的统一网络<sup>[25]</sup>。2020 年 11 月, 紫光展锐发布白皮书, 希望 6G 能够实现宏观与微观的连接、虚拟与现实的融合、数字与物理的映射、过去与未来的穿越、技术与需求的匹配, 强调人工智能的重要性<sup>[30]</sup>。2020 年 12 月, 大唐移动预计 6G 基础通信、智能、无线传感、网络安全、网络算力等能力将得到提升<sup>[31]</sup>。2021 年 4 月, NGMN 联盟分析了 6G 的驱动因素, 并根据 6G 属性和关键设计考虑因素提出 6G 的总体愿景<sup>[36]</sup>。2021 年 6 月, IMT-2030 推进组提出了 6G 愿景, 即“万物智联, 数字孪生”<sup>[32]</sup>。2021 年 8 月, 华为期待 6G 实现“万物智能”, 人与物的互联最终演变为智能互联<sup>[27]</sup>。除了不同组织发布的 6G 白皮书外, 在众多工作中也提出了 6G 愿景<sup>[40]-[42], [46]-[48], [50]-[52], [54], [59]</sup>。文献<sup>[40]</sup>展望了 6G 的三大特征, 即移动超宽带、超级物联网 (Internet of things, IoT) 和人工智能。文献<sup>[41]</sup>的作者认为, 6G 将实现万物连接、全维覆盖、技术交叉融合、类人智能自主的蓝图。文献<sup>[42]</sup>提出了 6G 的六 F 趋势集“全频谱、全覆盖、全维度、全收敛、全光子、全智能”。文献<sup>[46]</sup>设想 6G“人-物智能互联”和触觉通信。Saad 等<sup>[47]</sup>强调了技术融合的重要性, 从应用、趋势和技术方面提出了一个整体的 6G 愿景。文献<sup>[48]</sup>的作者认为, 6G 是物理、生物和数字世界的互联。中国移动<sup>[50]</sup>将 6G 愿景概括为“数字孪生和泛在智能”。文献<sup>[51]</sup>展望 6G 时代, 人类社会将成为泛在智能移动社会。在文献<sup>[52]</sup>中, 东南大学 (Southeast University, SEU) 和紫金山实验室 (Purple Mountain Laboratories, PML) 的尤肖虎教授等人提出了“全覆盖、全频谱、全应用、强安全”的 6G 愿景。在文献<sup>[54]</sup>中, 作者通过大量的调查, 指出了前几代通信系统向 6G 的颠覆性转变。文献<sup>[59]</sup>设想 6G“万物智能连接、数字孪生”的愿景。

总体而言, 6G 愿景可以描述为“全覆盖、全频谱、全应用、全感官、全数字、强安全”, 如图 3 所示。为了实现全覆盖, 6G 将从地面通信扩展到空天地海一体化通信网络。为了满足巨流量、巨连接的应用需求, 6G 通信网络将全面挖掘频谱资源, 包括 sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光波段。为了服务各个垂直行业, 通信、计算、存储、控制、传感、定位、AI、大数据等将深度融合, 产生通感一体化 (Integrated sensing and communication,

ISAC) 等全应用场景。6G 还将通过全息通信和存储、沉浸式扩展现实 (Extended reality, XR)、触觉互联网和其他应用, 为用户提供完整的感官体验。6G 将以数字孪生为基础, 实现数字世界与物理世界的映射, 最终实现“人-机-物-境”的智能连接。强安全体现在通信网络设计时考虑到安全性, 称为网络内生安全<sup>[61]</sup>, 包括物理层安全和网络层安全。与 AI 相结合, 6G 也将实现智能化的内生安全。

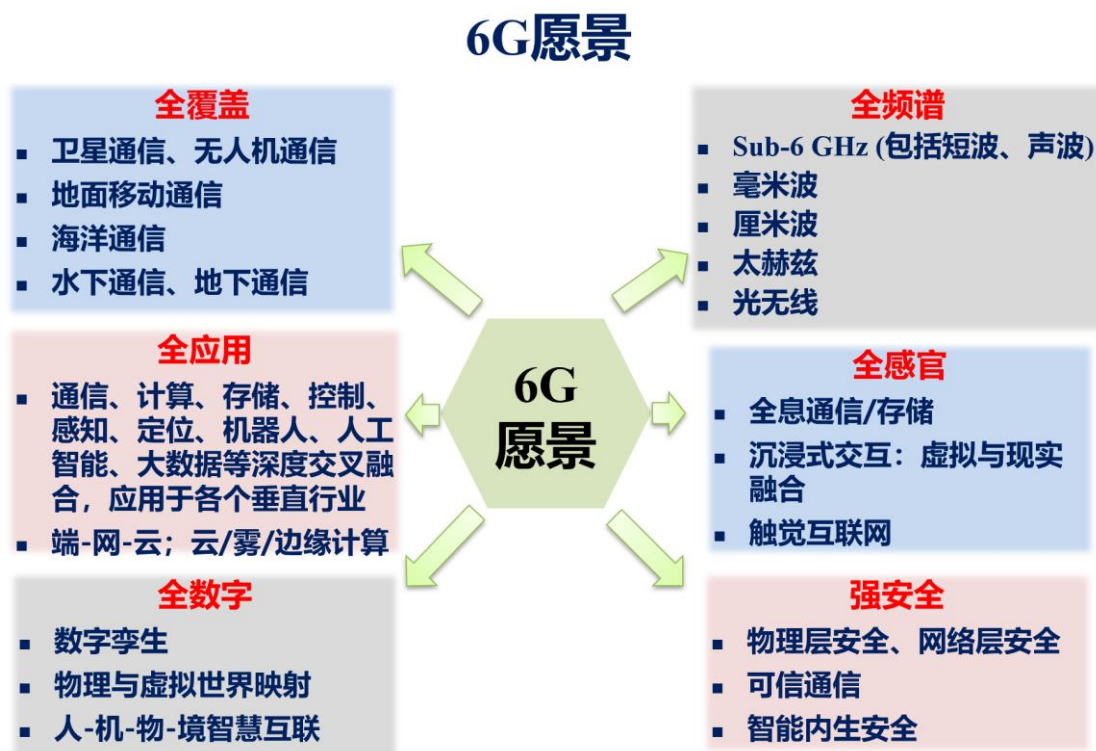


图 3 6G 愿景: 全覆盖、全频谱、全应用、全感官、全数字、强安全

## 2.1 全覆盖

目前通信业务主要局限于地面移动通信, 偏远地区和特殊场景仍然是盲区。为了实现无所不在的全覆盖, 6G 将从地面通信扩展到空天地海一体化通信网络, 集成卫星通信<sup>[62]</sup>、无人机通信<sup>[63]</sup>、地面超密集通信网络、海上通信<sup>[64]</sup>、水下通信<sup>[65]</sup>、地下通信<sup>[66]</sup>。通过整合各种通信网络, 6G 将实现无所不在的三维 (Three-dimensional, 3D) 覆盖和连接, 提供多种通信服务。全覆盖可为地面通信网络覆盖范围外的用户提供通信服务, 如偏远地区互联网接入、增强车载通信<sup>[54]</sup>、矿下通信等。当地面通信网络因灾害 (如洪水和火灾) 而中断时, 空天网络可提供快速、稳定和高质量的应急服务。全空间深度覆盖还可实现全空间环境监测、深海探测等业务。

2017 年 6 月, 欧洲成立了 Sat5G 联盟, 探索卫星与 5G 网络的融合<sup>[67]</sup>。2019 年 7 月, ITU-R M.2460-0 报告讨论了将卫星系统集成到下一代移动通信系统的主要挑战<sup>[68]</sup>。第三代合作伙伴计划 (The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 还开展了一系列非地面网络 (Non-terrestrial network, NTN) 标准化工作。3GPP TR 38.811 标准<sup>[69]</sup>和 3GPP TR 38.821 标

准<sup>[70]</sup>的发布，旨在探索天地融合通信架构。随着技术的不断发展和标准化工作的深入，6G 最终将借助空天地海一体化通信网络实现全覆盖。

## 2.2 全频谱

随着新的高数据速率通信服务和应用需求的不断发展，对无线移动流量的需求呈指数级增长。现有的通信系统正面临着射频频谱拥挤的挑战，不能满足更高速率的业务需求。5G 已经充分利用了 sub-6 GHz 频段，并开始探索毫米波频段<sup>[71]</sup>。在 6G 时代，为了满足巨流量、巨连接的技术需求，sub-6 GHz、厘米波（Centimeter wave, cmWave）、毫米波、太赫兹<sup>[72]</sup>、光无线频段<sup>[73]</sup>等所有频谱都将被充分利用。太赫兹频段具有超高带宽和超高数据速率的优势<sup>[74]</sup>，为 6G 无线数据中心<sup>[75]</sup>、纳米互联网<sup>[76]</sup>、超短距离通信等新的应用场景提供了强有力的支持。用于光无线通信（Optical wireless communications, OWC）的光学波段包括红外（Infrared, IR）、可见光和紫外线（Ultraviolet, UV）波段，它们带来了近数千太赫兹的未使用频谱资源。此外，可见光波段具有绿色经济、不受频谱管制、安全性高、无电磁干扰等优点<sup>[77]</sup>。在射频通信受限的场景下，OWC 具有巨大的应用潜力，并催生了一系列光通信技术，包括可见光通信（Visible light communications, VLC）、光照上网技术（Light fidelity, LiFi）、光学相机通信（Optical camera communications, OCC）、自由空间光学（Free space optical, FSO）通信、光探测与测距（Light detection and ranging, LiDAR）<sup>[78]</sup>。

作为迈向 6G 的太赫兹标准化工作的第一步，IEEE 802.15.3d 标准发布于 300 GHz 的太赫兹频段<sup>[79]</sup>。在 OWC 的标准化方面，现有工作包括与弥散红外通信相关的 IEEE 802.11 标准<sup>[80]</sup>，针对短距离 OWC 的 IEEE 802.15.7r1 标准<sup>[81]</sup>，以及针对数 Gbps OWC 的 IEEE 802.15.13 标准<sup>[82]</sup>。此外，IEEE 802.11bb 工作组一直致力于将光介质集成到基本 IEEE 802.11 标准中<sup>[83]</sup>。6G 将在 5G 的 sub-6 GHz 频段和毫米波频段的基础上，根据需要探索更高频段，最终实现全频谱的深度挖掘。多个频段将共存融合，实现不同业务。

## 2.3 全应用

随着业务的多样化和通信系统的不断发展，6G 将产生海量数据。人工智能、大数据等新技术将会被充分利用，以挖掘 6G 网络的智能潜力，实现一系列智能应用。一方面，这些新技术将有助于发展更先进、更智能的通信系统，为无线信道建模、网络多址接入、速率控制、缓存与重载、安全稳定连接等研究提供新的思路和范式<sup>[74], [84]</sup>。另一方面，泛在智能的 6G 网络也将提供智能应用，如智慧城市、智慧农业、智慧交通等。此外，6G 不仅提供通信服务，还将提供通信、计算、存储、控制、感知、定位和机器人技术相结合的其他服务，从而产生一系列多样化的服务应用，如 ISAC<sup>[85]-[87]</sup>。

近年来，人们对无线人工智能的研究兴趣浓厚，其目标是将人工智能与无线通信网络结合起来。2019 年 6 月，3GPP TR 23.791 发布了定义自动化蜂窝网络中数据采集和分析的功能



规范<sup>[88]</sup>。包括开放 RAN（Open-RAN, O-RAN）联盟在内的一些组织也在研究人工智能和无线通信网络的结合<sup>[89], [90]</sup>。与无线 AI 相比, ISAC 的发展还处于一个相对初级的阶段。希望各种应用深度融合, 共同为实现更智能、更全面的 6G 网络做出贡献。

## 2.4 全感官

从 1G 到 5G, 人与人之间的互联已经演变为人与物的互联。在 6G 中, 在多种通信技术的支撑下, 通过全息通信和存储、沉浸式 XR、触觉互联网等应用, 为用户提供完整的感官体验。人对现实的感知是通过各种感觉器官获得的。在 6G 的支撑下, 提供大带宽、低时延的可靠通信, 人类的视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉等五种感官信息都将通过 6G 通信网络得以实现, 并充分再现在用户面前, 实现虚拟与现实的融合<sup>[30]</sup>。预计 6G 通信系统将实现多感官互联, 在娱乐、技能学习、医疗健康等领域提供广泛的应用<sup>[91], [92]</sup>。

2019 年 6 月, 高通结合其在 XR 领域和毫米波频段的技术优势, 推出了全球首个融合 5G 和 AI 的 XR 平台, 即骁龙 XR2 平台<sup>[93]</sup>。全球许多科技公司, 如高通、微软、苹果、华为等, 都对 XR 产品进行了研究。此外, IEEE 1918.1 TI 标准工作组<sup>[94]</sup>也一直致力于触觉互联网的标准化, 讨论和研究触觉互联网的定义、KPI 要求、应用场景、架构、接口等技术方面的问题<sup>[91]</sup>。相信在未来通信技术和应用需求的全面推动下, 6G 最终能够在多种场景下为用户提供完整的感官体验。

## 2.5 全数字

在 6G 时代, 随着通信、感知、计算、存储技术的进步, 以及大数据和人工智能的发展, 数字孪生技术将进一步发展和演变。物理现实将被精确地数字化, 数字世界和物理世界将相互映射并相互影响。数字世界不仅仅是物理世界的数字映射。数字世界的推理和预测可以与物理世界的推理和预测相对应, 实时准确地反映和预测物理世界<sup>[32]</sup>, 为物理世界的决策提供参考。通过物理世界与虚拟数字世界的互联互通, 6G 将实现包括虚拟世界<sup>[25]</sup>“环境”在内的“人-机-物-境”的智能连接, 带动人体数字孪生、数字孪生城市等一系列应用<sup>[95]</sup>。

目前, 已有多个标准化组织开展了数字孪生的标准化工作<sup>[96]</sup>, 如 IEEE、ISO/IEC JTC1 等。与此同时, 创新型高科技企业, 如微软<sup>[97]</sup>、西门子<sup>[98]</sup>等也在探索数字孪生技术和产品。相信 6G 时代将是数字虚拟与物理现实深度融合的新时代。

## 2.6 强安全

随着通信网络的不断发展, 安全已成为一个重要问题。除了病毒、分布式拒绝服务 (Distributed denial of service, DDoS) 攻击等传统安全问题外, 随着新应用场景、新技术的发展, 以及用户信息的爆炸式增长, 6G 将面临一系列新的安全威胁, 如大规模数据泄露、学习型攻击等<sup>[99]</sup>。6G 在设计网络以提供各种新业务的基础上, 还需要在设计时考虑安全

性，实现强安全性，包括物理层安全和网络层安全。量子通信技术<sup>[100]</sup>、区块链技术<sup>[101]</sup>等潜在的安全技术将促进构成一个内生的安全机制，确保 6G 网络的可信、可管理和可控。与 AI 相结合，6G 还将实现智能内生安全，旨在独立识别和解决网络安全问题<sup>[102]</sup>、<sup>[103]</sup>。

通信安全一直是一个重要的研究热点。ISO/IEC JTC1 SC27 标准化小组发布了信息安全管理、供应链安全管理、网络虚拟化安全等一系列标准，包括 ISO/IEC 27005、ISO/IEC 27036、ISO/IEC 27033-7。3GPP 还发布了网络切片增强安全研究的 3GPP TR 33.813<sup>[104]</sup>、5G 系统安全架构和流程的 3GPP TS 33.501<sup>[105]</sup>等。此外，有各种标准化组织致力于 6G 安全，如 IEEE 和 ITU-T，总结在文献<sup>[106]</sup>中。安全是 6G 研究不可或缺的一部分。未来的 6G 网络将是一个高度安全和可信的网络，这是合理和必要的。

## 2.7 总结

总之，6G 将提供全覆盖，并提供一系列新颖的应用，如智能应用、全感官应用和数字孪生应用。这将通过对全频谱的深度挖掘和一系列新技术的融合来实现。此外，6G 将是一个考虑安全性的内生安全网络。

表 4 对 6G 愿景的相关论文进行了比较。可以看出，本文提出的对 6G 愿景整体的一致性描述是全面的，涵盖了目前学术界和工业界对 6G 愿景的绝大部分展望。此外，在强安全、全感官应用和数字孪生的前景方面也有一些新的研究兴趣，也将在本文中提及。

表 4 6G 愿景相关论文比较

参考文献	全覆盖	全应用	强安全	全频谱	全感官	全数字
6G Flagship [4]	√	√	△		△	
CCID [25]	√	√			△	√
UNISOC [30]	√	√	△	√	√	√
DATANG Mobile [31]	√	√	√		△	△
NGMN Alliance [36]	√		√			√
IMT-2030 [32]	√	√	√	√	√	√
HUAWEI [27]	√	√	√	√	△	√
L. Zhang <i>et al.</i> [40]		√			√	
Z. Zhang <i>et al.</i> [41]	√	√	△	△	√	
B. Zong <i>et al.</i> [42]	√	√		√		
L. Bariah <i>et al.</i> [46]	△	√		√	√	
W. Saad <i>et al.</i> [47]	√	√		√	√	
H. Viswanathan <i>et al.</i> [48]		√	△		√	√
G. Liu <i>et al.</i> [50]	△	√	△	△	△	√
S. Chen <i>et al.</i> [51]	√	√	√	√		
X.-H. You <i>et al.</i> [52]	√	√	√	√	△	△
W. Jiang <i>et al.</i> [54]	√	√	√	√	△	√

Z. Wang <i>et al.</i> [59]	△	√		△	△	√
<b>本文</b>	√	√	√	√	√	√
<p>注意：√符号表示在参考文献中清楚地概述了这方面的前景，△符号表示在参考文献中只提到了这方面的前景，但没有清楚地概述，空白表示在参考文献中没有显示这方面的前景。</p>						

## 第三章 6G 技术需求与应用场景

6G 愿景中设想的不同的应用场景将对 6G 通信系统提出不同的性能要求。本节将针对 6G 的技术需求和应用场景进行详细讨论。

### 3.1 6G 技术需求

ITU-R 选取了 8 个参数作为国际移动通信 2020 (IMT-2020) 的 KPIs, 然而随着移动通信网络的快速发展, 这些指标将不足以满足 2030 年之后的那些变革性应用场景。5G 性能评估的 8 个 KPIs<sup>[107]</sup>仍适用于 6G, 但相应的数值需要根据技术的发展和新应用的出现而进行更新。此外, 还需增加相关指标来评估 6G 新业务的性能, 包括定位、感知、安全和智能等。

为了填补这一空白, 已有相关研究机构和学者提出了一些定量和定性的 KPI<sup>[4], [25], [27], [29], [30], [34], [35], [37], [41], [44], [45], [47], [48], [50]–[54], [56]–[58], [107]–[109]</sup>。表 5 给出了 6G KPIs 相关研究工作的总结对比, 分析可知现有文献中提出的 KPIs 仍较局限, 未能全面地体现 6G 重要特征, 并且文献中对相关 KPIs 的分析也不够深入。例如, 文献[4]、[29]、[30]、[34]、[48]、[53]、[54]、[108]中虽提及需要制定安全和智能等相关性能指标, 但并未定义给出相应 KPIs。另外, 针对时延抖动、网络 EE 等 KPIs<sup>[25], [108], [109]</sup>, 不同文献给出的参考值差异较大, 从而会导致混淆。针对成本效率、安全容量以及智能化水平<sup>[52], [108]</sup>等新提出的 KPIs, 现有的 6G 综述文献未给出相应的参考值。因此, 本文旨在提出更全面、更合理的 KPIs, 并在广泛调研的基础上定义其参考值。图 4 给出了本文所提出的 17 个 6G KPIs, 其中标红部分为 5G 标准中未考虑到的指标。通过列举 5G 指标, 可以提供更加直观的比较。表 6 总结了 5G 和 6G 的 KPI 的分类、定义, 相关参考文献以及对比。5G KPIs 相关的文献已在表中注明。6G KPIs 的定量取值是基于大量文献分析所得, 并在文中给出了解释。本文将所提出的 KPIs 分为四大类, 具体划分如下文。

#### 3.1.1 数据速率&时延

由于大量新服务的出现, 6G 无线通信必须满足更高速率和更低时延。为了评估 6G 在该方面的表现, 提出了峰值速率、用户体验速率和时延三个性能指标。对于 6G 网络来说, 通过应用 THz、OWCs 等技术, 峰值速率可达 1 Tbps, 该数值是 5G 的 50 倍<sup>[27], [30], [35], [50], [53], [54], [57], [58], [109]</sup>。用户体验速率是指 95%以上概率能够保障的用户速率最大值 (当用户业务需要时), 其在 6G 时代将达到 10 Gbps<sup>[27], [37], [50], [51], [53], [108]</sup>。时延, 即空口接入的最小延迟, 将在智能驾驶、远程手术、工业控制等特殊应用中达到 0.1 ms<sup>[4], [25], [27], [29], [30], [34], [35], [44], [48], [50]–[54], [108], [109]</sup>。此外, 时延抖动是量化通信系统中时延变化的一个重要指标。随着确定性网络的发展<sup>[114]</sup>, 该指标在 6G 系统中可达到 1  $\mu$ s<sup>[4], [25], [27], [29], [30], [34], [35], [44], [48], [50]–[54], [108], [109]</sup>。

表 5 相关文献 6G KPIs 总结对比

参考文献	KPIs 总数	数据速率&时延			容量&覆盖率				服务效率		多元化服务评估							
		峰值速率 (Tbps)	用户体验速率 (Gbps)	时延 (ms)	时延抖动 (ns)	区域流量密度 (Gbps/m <sup>2</sup> )	连接数密度 (设备/km <sup>2</sup> )	覆盖率 (%)	频谱效率	网络能效	成本效率	移动性 (km/h)	电池续航能力(年)	可靠性	定位精度(室内&室外 cm)	传感/成像分辨率 (mm)	安全容量	智能化水平
ITU-5G [107]	8	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓						
6G Flagship [4]	8	✓		✓		✓	✓			✓			✓	✓	✓		○	
NTT [34]	7	✓		✓		✓	✓	✓					○	✓	✓	○	○	
CCID [25]	9	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓			✓			
Samsung [35]	7	✓	✓	✓			✓		✓	✓			✓					
SEU & PML [52]	12	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓
VIVO [108]	12	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		○	
UNISOC [30]	10	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓		✓	✓			○
China Unicom [29]	11	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	○	○
5GIA [37]	6		✓	✓		✓	✓			✓					✓			
HUAWEI [27]	11	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓	✓		
IMT-2030 [33]	14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓		✓
I. F. Akyildiz [109]	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓				
Z. Zhang [41]	8	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓						
L. U. Khan [44]	7	✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓				
G. Gui [45]	8	✓		✓		✓	✓		✓	✓							✓	✓
W. Saad [47]	5	✓		✓					✓	✓			✓					

H. Viswanathan [48]	7	✓		✓		✓	✓	✓					○	✓	✓	○		
G. Liu [50]	10	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓		✓	✓			
S. Chen [51]	11	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓			
J. R. Bhat [53]	14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	○	
W. Jiang [54]	11	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓		○	
C. D. Alwis [56]	8	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓						
H. Tataria [57]	8	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓						
D. C. Nguyen [58]	7	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓								
本文	17	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

注意：符号✓表示此 KPI 在文献中有定义。符号○表示文献没有明确定义此 KPI，但提到需要使用此类型的指标。空白表示文献中没有涉及此 KPI。

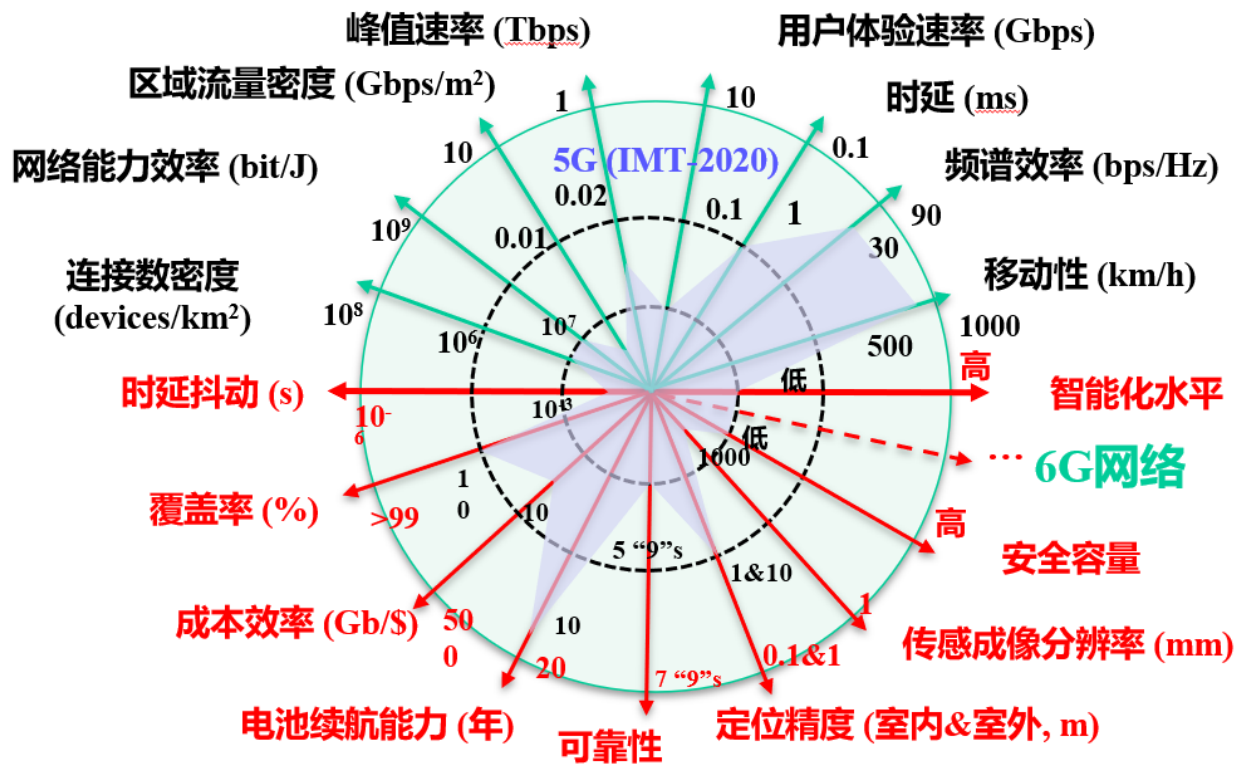


图 4 6G 关键性能指标

### 3.1.2 容量&覆盖率

为了支撑智慧工厂、智慧城市等下一代新场景的需求，更高的区域流量密度和连接密度是需要提供的基本条件。区域流量密度应达到 10 Gbps/m<sup>2</sup> [25], [27], [29], [34], [44], [50], [53]，连接数密度需达到 10<sup>8</sup> 设备/km<sup>2</sup> [4], [50], [52], [108]。此外，6G 网络的另一个重要需求是为用户提供更广泛

的无缝网络覆盖。相比于 5G 二维 (Two dimensional, 2D) 陆地覆盖, 6G 需扩展至 3D 全球覆盖<sup>[54]</sup>。5G 网络仅能覆盖陆地和一些近海地区, 包含 20% 的陆地和 5% 的海洋<sup>[111]</sup>, 约占整个地球的 10%。预计 6G 网络的覆盖率将超过 99%<sup>[51], [58]</sup>。在高价值区域, 6G 覆盖需要进一步优化 EE 和用户体验, 而在低价值区域, 降低覆盖成本极为重要<sup>[108]</sup>。

### 3.1.3 服务效率

为了满足可持续发展的需要, 本文提出了三个与效率相关的指标, 全面考虑多层次业务效率。随着先进频谱管理技术的发展, 6G 系统的频谱效率 (SE) 可达到达到 90 bps/Hz, 是 5G 的三倍<sup>[30], [44], [51], [52], [54], [58]</sup>。网络 EE 是指 1 焦耳能传输的比特数。根据文献<sup>[108]</sup>, 一个典型的 5G 基站的消耗约为 1-2 kW, 平均数据速率为 10 Gbps。因此, 5G 网络的 EE 约为  $10^7$  bit/J。6G 网络的 EE 将在 5G 的基础上提高 100 倍, 以相同或更低的能耗提供更高效的服务<sup>[27], [52], [108]</sup>。作为 SE 和 EE 的补充, 经济效率可用来评估折中的有效性<sup>[115]-[117]</sup>。文献<sup>[118]</sup>提出了一个与经济效率类似的指标, 即成本效率, 定义为用户的数据消耗收益与数据流量成本的比率。文献<sup>[119]</sup>分析了 5G 系统的成本效率与 EE 之间的折中关系。然而, 直到 6G 时代, 成本效率的重要性才逐渐得到重视。考虑成本效率可有助于设备供应商和服务团队在为消费者提供高质量服务的同时考虑通信行业盈利能力。文献<sup>[108]</sup>提出用户的通信支出预计将低于人均国内生产总值 (Gross domestic product, GDP) 的 1%。据粗略估计, 当人均 GDP 为 1 万美元而通信成本为 100Gb/用户/月时, 5G 的成本效率约为 10Gb/美元。由于人均 GDP 将翻倍并且业务流量将增加 100 倍, 6G 的成本效率将达到 500 Gb/美元。

### 3.1.4 多元化服务评估

6G 网络将极大地增强并扩展 5G 应用<sup>[52]</sup>。而随着应用的不断增加, 6G 通信系统需要新的指标来评估多样化服务的质量。例如, 飞机和高铁等高速移动通信场景对移动性有很高的要求。6G 通信支持收发端的移动性将高于 1000 km/h, 这相较于 5G 有显著提升<sup>[25], [29], [30], [44], [50], [51], [53], [54], [57], [108], [109]</sup>。文献<sup>[4]</sup>指出电池将是物联网通信发展的一个明显阻碍。此外, 文献<sup>[27]</sup>还指出, 智能城市、智能家居等场景对传感设备的电池寿命有很高的要求, 需要提高电池寿命来确保传感设备的稳定性。智能场景的最长电池寿命预计为 20 年<sup>[4], [27], [53]</sup>。物联网的发展对通信系统的可靠性提出了很高的要求, 即在一定的延迟上限下所传输信息的正确性。从表 5 可以看出, 文献<sup>[107]</sup>未考虑可靠性, 但在 6G 中可靠性已经引起了广泛关注。6G 网络的可靠性要求取决于具体的应用。对于增强的超可靠和低延迟通信 (Ultra-reliable low-latency communication, uRLLC) 等要求严格的场景, 在 1000 万传输位中只允许出现一个错误位<sup>[48], [53], [57], [109]</sup>。感知定位和成像是万物智联的重要基础。6G 系统室外场景定位精度预计达到 1 米, 室内场景的定位精度预计达到 10 厘米<sup>[4], [25], [108]</sup>。6G 传感/成像分辨率预计将达到 1 mm<sup>[27]</sup>。此外, 本文还提出了安全容量和智能化水平两个重要指标, 可对 6G 系统的服务能

力进行定性评估。6G 通信系统可以通过量子通信和区块链等新技术实现内生安全，从而使系统具有更高的安全能力。在文献[4]、[29]、[34]、[45]、[52]-[54]、[108]中均考虑了相关指标。此外，随着 AI 技术的加速渗透，6G 通信系统的智能化水平有望大大提高<sup>[29],[30],[45],[52]</sup>。然而，目前仍缺少针对这两个指标的定量研究。

### 3.2 6G 应用场景

在 5G 时代，主要有增强型移动宽带（eMBB）、大规模机器通信（mMTC）和 uRLLC 三大应用场景，可满足大带宽、高速率、大连接密度、高可靠性和低时延的要求。已有大量文献对 6G 应用场景进行展望。如图 5 所示，相关的运营商和行业联盟列出了一些应用和用例<sup>[120]-[122]</sup>。可以看出，工业界和运营商对不同领域的典型场景非常感兴趣，如与个人领域相关的沉浸式应用、商业领域的机器人、自动化和远程数据收集。由于不同的应用场景对通信系统的 KPIs 有不同的要求，因此类似 5G 一样使用 KPIs 对应用场景进行分类是合理的。然而，大部分研究只介绍了 6G 中几种可能的应用场景，但没有给出对这些场景的分类，包括 6G 白皮书<sup>[25],[27],[29]-[32],[35]</sup>和一系列 6G 综述<sup>[46],[48],[49],[51],[57]</sup>。同时，一些文献中应用场景的分类与 6G KPI 无关，如文献[50]中智能生命、智能生产和智能社会的应用，文献[59]中沉浸式、智能化和泛在的应用。此外，其他研究工作中基于 6G KPI 的应用分类并不全面。例如，文献[43]和[53]的作者忽略了一系列新应用，如空-天-地-海一体化网络和数字孪生的应用。You 等人<sup>[52]</sup>忽略了 5G 中结合典型场景特征定义的新场景。Jiang 等人<sup>[54]</sup>忽略了 5G 应用的增强。因此，迫切需要对潜在的 6G 应用场景进行全面的研究，并进行合理的分类。

表 6 5G 与 6G 性能指标对比

	KPI	定义	5G	6G	倍增
数据速率 & 时延	峰值数据速率	单用户/设备在理想条件下可实现的最大数据速率	20 Gbps <sup>[107]</sup>	1 Tbps	50×
	用户体验速率	移动用户/设备在覆盖范围内普遍可用的数据速率	100 Mbps <sup>[107]</sup>	10 Gbps	100×
	时延	从信号发送数据包到目标接收的时间	1 ms <sup>[107]</sup>	0.1 ms	10×
	时延抖动	系统中的延迟变化	1 ms <sup>[110]</sup>	1 μs	1000×
容量 & 覆盖率	流量密度	单位地理区域的服务总流量	10 Mbps/m <sup>2</sup> <sup>[107]</sup>	10 Gbps/m <sup>2</sup>	1000×
	连接密度	单位面积连接和/或可访问设备总数	10 <sup>6</sup> devices/km <sup>2</sup> <sup>[107]</sup>	10 <sup>8</sup> devices/km <sup>2</sup>	100×
	覆盖率	网络服务覆盖率	10% <sup>[111]</sup>	99%	10×
服务效	频谱效率	单位小区和单位频谱资源的平均数据吞吐量	30 bps/HZ <sup>[109]</sup>	≥90 bps/HZ	≥3×
	能量效率	单位能耗发送至/接收自用	10 <sup>7</sup> bit/J <sup>[108]</sup>	10 <sup>9</sup> bit/J	100×



率		户的信息比特数			
	成本效率	用户数据消费收益与数据流量成本之比	10 Gb/美元 <sup>[108]</sup>	500 Gb/美元	50×
多元化服务评估	移动性	可实现预定服务质量和无线节点间无缝转换的最大速度	500 km/h <sup>[107]</sup>	1000 km/h	2×
	电池寿命	物联网设备电池寿命	10 年 <sup>[112]</sup>	20 年	2×
	可靠性	在确定延迟上限下成功接收的数据包百分比	99.999% <sup>[35]</sup>	≥99.99999%	≥100×
	定位精度	室内外定位精度	1 m & 10 m <sup>[35]</sup>	10 cm & 1 m	10×
	感知/成像分辨率	感知与成像分辨率	1 m <sup>[113]</sup>	1 mm	1000×
	安全容量	存在窃听情况下从发送端到接收端的可信信息速率	低	高	—
	智能化水平	信息系统的智能化水平	低	高	—

6G 运营商/行业联盟	6G 应用和使用案例
 <b>NGMN Alliance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 增强型人际通信（沉浸式体验、远程呈现和多模式交互）</li> <li>• 增强型机器通信（机器人通信和交互）</li> <li>• 使能服务（定位、映射、自动保护、智能健康和制造）</li> <li>• 网络演进（以服务形式公开的原生 AI、能效和覆盖）</li> </ul>
 <b>NextG Alliance</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 网络机器人和自主系统（服务机器人，现场机器人）</li> <li>• 多感官扩展现实（体育/赛车、游戏/娱乐、协同设计、网真、教育）</li> <li>• 分布式感知和通信（远程数据收集、可穿戴设备、消除数字鸿沟、公共安全、同步数据信道、体内网络）</li> <li>• 个性化用户体验（个性化酒店/购物体验）</li> </ul>
 <b>6G IA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 社会（应急响应和预警系统，智慧城市交通）</li> <li>• 个人（个人健康随时监测和驱动，生活和工作随时随地）</li> <li>• 商业（来自孪生机器人的协助，可持续粮食生产）</li> </ul>

图 5 6G 运营商/行业联盟对 6G 应用场景的展望<sup>[120]-[122]</sup>

总的来说，6G 将继续增强和扩展上述应用场景，以进一步实现增强移动宽带（Further-eMBB, feMBB）、超大规模机器通信（Ultra-mMTC, umMTC）和增强型高可靠低时延通信（Enhanced-uRLLC, euRLLC）。在 2030 年，这三大类场景不仅需要满足传统的 KPI，如通信系统的数据速率、连接密度和延迟，还需满足成像、定位、传感、安全能力和智能化水平等新 KPI。此外，随着技术的融合发展，6G 还将出现融合多种场景特点的潜在应用场景。除了增强的三大类 5G 场景，预计 6G 还将提供更多的应用场景，包括：1) 大规模增强移动宽带（Massive eMBB, meMBB），目标是高数据速率、大带宽、大连接密度，如密集场景通

信；2)移动宽带可靠低延迟通信（Mobile broadband reliable and low latency communication, MBRLLC），适用于高数据速率、大带宽、低延迟、高可靠的场景，如无线数据中心、无线脑机接口等；3)大规模高可靠低延时通信（Massive uRLLC, muRLLC），在智能交通、智慧工厂、工业物联网等特殊场景下，需要低延迟、高可靠性的同时拥有大型连接，用于大规模机器式通信。此外，还可能存在其他潜在的场景，例如极低功耗通信、数字孪生应用、空-天-地-海一体化网络以及远距离、高移动性通信。图 6 展示了对 6G 应用场景的展望。接下来，将介绍在 6G 时代具有代表性的一些新应用场景。

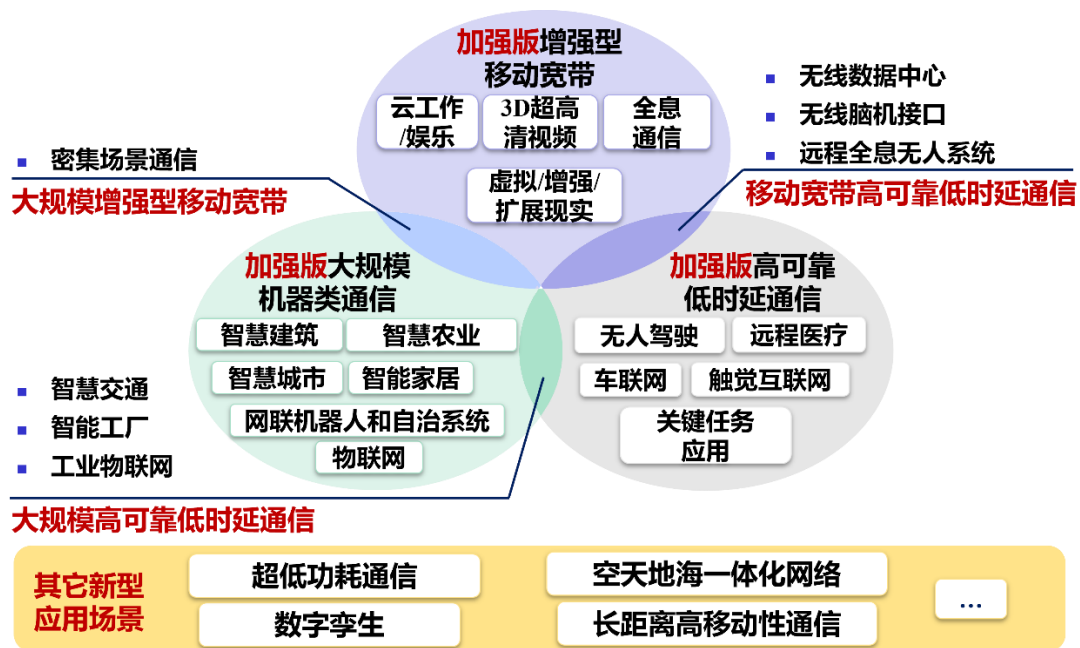


图 6 6G 的潜在应用场景

### 3.2.1 无线数据中心

随着科技的发展，各个行业都产生了海量的数据，这些数据对现代社会的正常运转起到了至关重要的作用。此外，AI和大数据等技术也有望更深入地挖掘数据中的隐藏信息，以实现更智能的应用。除了注重技术发展，这些海量的数据也需要足够的存储空间。目前数据中心以有线方式为主，存在复杂度高、维护成本高、功耗高、空间大<sup>[46]</sup>的局限，故对无线数据中心的需求日益增加。然而，现有的无线通信系统在实现超高数据速率传输方面仍面临巨大挑战，无法满足数据中心对数据存储、传输和调度的需求。随着对太赫兹和云数据中心研究的进一步深入，预计 6G 将利用太赫兹的超大带宽实现超高数据速率传输<sup>[74], [123]</sup>，实现下一代基于云的无线数据中心<sup>[46], [75]</sup>。数据将存储在多个云服务器上，THz 将作为传输介质，以支持无线数据中心的部署和运营。

### 3.2.2 触觉互联网

基于图 1 总结可知，前几代通信服务主要集中在视觉和听觉信息的数字化上。随着 6G 时代的到来，用户的触觉信息也可以被收集、数字化并通过网络传输，最终形成触觉互联网。触觉互联网的基本特征包括感知实现和可用于转移“技能”的同步动作<sup>[91]</sup>。触觉机器人将通过触觉互联网充当人类的多模态化身<sup>[124]</sup>。用户的触觉信息可以通过网络传输，远程机器人根据用户的命令完成相应的动作。在远程获取实时状态后，用户可以进行相应的交互和控制。触觉信息的传输对网络时延和可靠性有很高的要求。未来，医生可以通过触觉互联网远程指导机器人进行身体检查，远程机器人可以帮助矿工在高风险地区完成采矿。随着超低延迟和超高可靠性通信的实现，远程机器人手术<sup>[92]</sup>也将成为可能。

### 3.2.3 数字孪生应用

目前，学术界和工业界都在探索物理现实世界与数字世界之间的联系。随着数字孪生技术的进一步发展和演进，物理现实将会被更加精确地数字化。数字世界和物理世界将相互映射和影响，实现同步发展<sup>[30], [99], [125]</sup>。在 AI 等技术的帮助下，用户在数字世界中的操作和预测可以对应到物理世界中，从而为物理世界中的决策提供参考。数字孪生有望应用于多个领域<sup>[31], [52], [95], [126], [127]</sup>。通常，城市数字孪生系统<sup>[95]</sup>是指城市基础设施、交通网络、城市生态环境、电力系统等各种系统相互连接的数字孪生系统，提供环境监测、突发事件预警、风险预测等一系列功能。城市数字孪生的实现将有助于应急预案的快速决策和城市设计管理方案的评估。另一个例子是利用 6G 和信息通信技术（ICT）模拟虚拟人体的数字孪生体域网<sup>[52]</sup>。它可以全天候跟踪、提前预测疾病、模拟虚拟人体的手术和用药。药物的疗效可以预测，从而可以加快药物开发，降低成本，提高人类生活质量。数字孪生体域网与云、雾、传感器层计算等技术的结合，也将有助于新冠感染（COVID-19）等疫情管理，包括传染源搜索、药物开发等方面。这些新颖应用场景的实现依赖于更智能、更先进的 6G 技术。

### 3.2.4 无线脑机接口应用

无线脑机接口是一种通过大脑帮助用户控制电子设备的方法，常用于提供用户与智能家居或医疗设备之间的智能通信<sup>[128], [129]</sup>。它将用户的大脑信号传输到电子设备，同时分析这些信号并转换为设备的命令和操作<sup>[43]</sup>。无线脑机接口最初应用于医疗场景，为瘫痪和帕金森等神经损伤和疾病患者提供一种新的信息传输方法，从而提高病人的生活质量。最近，BrainGate 实现了一种大带宽、高精度和低功耗的无线脑机接口系统，两名瘫痪的测试人员可以用他们的大脑信号在平板电脑上“执行”点击和打字操作<sup>[130]</sup>。此外，无线系统已经过测试，其性能非常接近有线计算机外围设备。文献<sup>[131]</sup>的作者提出了一种完全集成的无线传感器脑机接口，可将重要的体感信号、指尖强度、肢体关节角度等信息传输到大脑，这

为下一代神经义肢的体感反馈传输提供了一种新的解决方案。除了在医疗保健场景中的应用，6G 中的无线脑机接口还可以帮助用户更好地与环境及使用无线脑机接口支持设备的其他用户进行通信<sup>[47]</sup>。未来，更高速度、更高可靠性、更低延迟、更高感知精度、更低功耗的智能 6G 将有助于实现无线脑机接口，为智能生活提供动力。

### 3.2.5 全息通信

在许多科幻电影中，都有主人公与另一个人的虚拟形象交流的场景，这些场景在 6G 时代都有望成为现实。人们可以看到其他人的全息图像并和他们互动，就好像人们在同一个地点进行面对面交流。全息通信在传统 2D 视频通信的基础上，可以实时呈现高精度的 3D 图像，这需要非常大的带宽、低延迟和高分辨率。2D 分辨率、颜色、3D 倾斜度、角度、位置等信息将通过通信网络<sup>[54]</sup>传输。除了现实世界中的实时全息通信，全息通信还将为用户带来与过去和未来连接的体验<sup>[30]</sup>。无论是已经逝去的人、已经消失的事物，还是尚未出现的事物，都可以全息的方式保存和建构。用户将能够与这些过去和未来的全息图像进行交流，并在过去和未来的世界中获得新的体验。

### 3.2.6 应急救援通信

从 1G 到 5G，地面移动通信系统实现了更宽的覆盖范围、更大的带宽、更快的速度、更低的时延和更密集的网络。然而，当一个地区遭受大规模的自然灾害，如地震、洪水、泥石流或其他人为事故时，该地区的通信网络可能会完全瘫痪。需要帮助的人不能及时发出求救信号，外部救援任务也会受到阻碍。此外，在海洋和沙漠等一些场景下，通信网络覆盖不足。在发生事故和紧急情况时，黄金 72 小时将是挽救人们生命的关键时间。随着 6G 中 3D 全空间覆盖的进一步实现，无人机<sup>[132]-[134]</sup>和卫星通信网络<sup>[132], [135]</sup>将快速响应并按需部署，这些设备将会提供应急通信来帮助人们快速搜索和救援。考虑到黄金救援时间，需要快速提供大带宽的网络部署和足够的网络覆盖。同时，由于非地面网络对电池的要求较高，需要尽量降低功耗使应急通信系统维持更长的时间。

### 3.2.7 沉浸式 XR

XR 是 VR、AR 和混合现实 (MR) 的总称。VR 能够使用户与另一个完全虚拟的数字世界互动，而 AR 则为用户提供真实物理世界中虚拟物体的互动体验。MR 集成了 VR 和 AR，为用户提供与现实世界、数字 VR 世界和完全虚拟物体的互动<sup>[43]</sup>。虽然 XR 在 5G 时代有一些实际应用，但仍处于初始阶段，类似于移动互联网的视频服务<sup>[54]</sup>。随着计算、通信、传感、成像、存储和其他技术的不断发展，6G 将实现完全沉浸式的 XR。包括视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉在内的虚拟五感将被数字化和传输。视频图像的分辨率将更高，颜色将更真

实，延迟将更低，给用户带来更真实和身临其境的体验。未来，6G 的超高数据速率、超大带宽、低延迟、高可靠性、高成像分辨率、高传感能力等特点将使沉浸式 XR 应用成为可能，可应用于娱乐、远程医疗、远程工业控制等一系列场景。

### 3.3 系统性能分析与 KPIs 折中

由于通信技术的发展和业务需求的丰富，6G 将提供更全面、更优质的通信体验，在系统性能上将全面超越 5G。为了更全面地评估 6G，本文提出的 17 个关键绩效指标可用于分析网络传输性能、网络接入性能、网络效率和服务质量等方面的系统性能，如表 6 所示。

尽管 6G 将在这 17 个关键绩效指标上有一个阶梯式的变化，但由于硬件损伤、实际传播环境和其他限制，这些关键绩效指标往往不能在同一系统中同时得到改善<sup>[136]</sup>。此外，通信系统的性能改进往往是以能耗为代价的。根据文献[137]，5G 的能耗是 4G 的 3 倍以上，因此可以预计，6G 的能耗可能会超过 5G。因此，考虑到资源限制，在所有方面保持最佳性能对于一个实际应用的通信系统是多余的。如前所述，6G 系统将被扩展以支持更丰富和多样的应用场景。除了通信，6G 预计将提供新的服务，如数字孪生、人工智能、计算、定位和感知。虽然 6G 拥有广泛的应用，但系统资源难以同时满足所有的超高性能需求，每个场景和应用中的系统性能指标的折中是不可避免的。在文献[138]中，作者总结了不同 6G 应用场景下的技术要求，包括 feMBB、umMTC、euRLLC 和 MBRLC。例如，研究者提出在 euRLLC 场景中，延迟、抖动和可靠性比峰值速率和连接性更重要。对关键绩效指标的不同要求也出现在其他 6G 场景中，这也是本文分析性能折中的理论基础。表 7 总结了不同应用场景的 6G 技术要求。对于已有量化范围的技术要求，如数据速率、延迟和连接密度，我们对这些关键绩效指标在不同应用场景下的量化要求进行了调研。需要注意的是，每个类型的场景并不要求所有指标都达到极致。所以，我们只为这些需要重点关注的指标提供具体的量化数值。然而，对于尚未进行定量研究的安全能力和智能水平，我们只提供定性的重要性衡量。可以看出，在不同的应用场景中，6G 对 KPI 的要求有很大的差异。例如，数字孪生对数据速率、延迟、区域流量容量、连接密度、定位、分辨率和智能水平提出了很高的要求。极低功率的通信需要高水平的连接密度和能源效率。文献[54]中提出了一个类似但较为简化的表格，该表列出了不同技术对关键绩效指标的不同需求水平。因此，基于内在关系和应用场景的 KPI 之间的权衡是 4G 以来的一个热门话题，许多学者已针对这个基本问题进行研究。

在所有的关键绩效指标中，SE 和 EE 一直是最受关注的指标之一。因为每一次通信系统的升级都伴随着这两个指标的大幅增长。对于通信系统运营商来说，同时提高 SE 和 EE 是最理想的。然而，在实际的系统部署中，EE 会随着 SE 的提升而降低，这意味着必须在 SE 和 EE 方面达到最佳折中点，以获得更好的整体性能<sup>[139]</sup>。文献[140]和[141]研究了中继系统 SE 和 EE 的折中，文献[142]分析了可重构智能表面（Reconfigurable intelligent surface, RIS）辅助系统 SE 和 EE 的折中。基于 SE 和 EE 的折中，文献[143]研究了卫星室内网络的功率分配，并在文献[144]中提出了混合时分多址接入（Time division multiple access, TDMA）非正

交多址（Non-orthogonal multiple access, NOMA）系统设计。此外，作为 SE 和 EE 的补充 KPI，成本效率也受到广泛关注。在[145]中讨论了蜂窝网络的 SE、成本效率及其关系。在[146]中，提出了一个正交空间频率指数调制（IM）方案，并研究了 SE-EE-成本效率-经济效益的折中性能。文献[147]提出了一种用于星地一体化网络网络的自适应传输方案，并分析了基于该方案的 SE、EE、误码率和经济效率之间的权衡。

除了 SE 和 EE 之间的折中之外，其他关键绩效指标之间的折中对于通信系统设计同样具有指导意义。文献[148]和[149]对二级蜂窝网络和无人机网络的数据速率、时延及其权衡进行了研究。此外，时延和 EE 的折中也引起了关注。文献[150]和[151]分析了 D2D 通信和海上无线网络的折中。可靠性作为最重要的 KPI 之一，同样被广泛研究。它与安全、时延和成本效益的折中已经得到验证<sup>[152]-[155]</sup>。关于不同应用场景下的折中，文献[156]分析了时延和误码率性能，并解决了 6G 无小区大规模 MIMO 系统中 muRLLC 场景的时延和错误概率最小化问题。在文献[157]中，作者强调了 EE 和 QoS 在设计空-天-地系统的资源管理和网络结构中的重要性。文献[158]讨论了触觉互联网的性能分析和 uRLLC 大规模 MIMO 系统的折中。总之，6G KPIs 之间进行折中以实现最佳的系统性能已被广泛认可，对 SE、EE、容量、可靠性和其他指标的研究也取得了丰硕成果。然而，由于 6G 系统更加复杂，应用场景更加丰富，仍然需要对 6G 系统性能分析和 KPIs 之间的折中进行进一步研究。

表 7 不同应用场景中的 6G KPI 要求

应用场景	feMBB	umMTC	euRLLC	meMBB	muRLLC	MBRLLC	SAGSIN	Digital twins	LDHMC	ELPC	
数据速率 & 时延	峰值速率	$\geq 1$ Tbps [41], [57], [33], [49]	$>24$ Gbps [56]	$>1$ Gbps $\sim 1$ Tbps [41], [56]	$\geq 1$ Tbps	$0.1\sim 1$ Gbps <sup>[56]</sup>	$\geq 1$ Tbps	$\geq 1$ Gbps	$0.1\sim 1$ Tbps [33], [35]	30 bps $\sim 10$ Gbps	$1\sim 50$ Mbps [56]
	用户体验速率	$\geq 1\sim 10$ Gbps [33], [49], [31], [41]	1 Gbps [49]	$\approx 100$ Mbps $\sim 1$ Gbps [33], [41], [57]	$\geq 1$ Gbps	100 Mbps <sup>[33]</sup>	$0.1\sim 1$ Gbps <sup>[33]</sup>	$0.1\sim 10$ Gbps <sup>[33]</sup>	$\geq 1$ Gbps [33]	/	/
	时延	$0.1\sim 10$ ms [56], [57], [31], [33]	$\ll 5$ ms	$<0.1\sim 3$ ms <sup>[30]</sup> , [56], [31], [49]	$1\sim 10$ ms	$<1$ ms <sup>[25]</sup>	$<1$ ms <sup>[33]</sup>	$0.7\text{ms}\sim 40\text{ms}$	$0.1\sim 1$ ms [30], [31]	$>1$ s	$1$ ms $\sim 1$ s [56]
	时延抖动	$\leq 10$ us [110]	/	$1\sim 100$ us [53]	/	$1\sim 100$ us [31], [33], [57]	$1\sim 100$ us	/	/	/	/
	区域流量容量 (Gbps/m <sup>2</sup> )	1 <sup>[41]</sup>	$0.1\sim 10$ [33]	/	$1\sim 10$	/	$1\sim 10$	/	$0.1\sim 10$ [31], [33]	/	/
容量 & 覆盖	/	$10^7\sim 10^8$ [34], [56], [49]	/	$10^8$	$10^6\sim 10^8$ [33], [44], [56]	/	/	$10^7\sim 10^8$ [31], [33]	/	$10^7$ [41]	

盖 率	备 /km <sup>2</sup> )										
	覆 盖 范 围 (%)	/	/	/	/	/	/	99	/	/	/
	频 谱 效 率	5x	5x <sup>[49]</sup>	5x <sup>[49]</sup>	5x <sup>[41]</sup>	5x <sup>[49]</sup>	5x <sup>[56]</sup>	3x <sup>[161]</sup>	2x <sup>[35]</sup>	5x <sup>[162]</sup>	/
	网 络 能 效	10~10 0x <sup>[41]</sup>	10~10 0x <sup>[41],[49]</sup>	/	10x <sup>[41]</sup>	/	/	10x	10x	/	10~1 00x <sup>[41]</sup>
服 务 效 率	成 本 效 率	5x	5x	/	5x	/	/	3x	/	/	/
	移 动 性 (km /h)	800	100	100	80~90	20~60	10	≥ 1000 <sup>[33]</sup>	100	≥ 1000 <sup>[49],[56],[41]</sup>	5~10
	电 池 寿 命 (年)	/	10~20	/	/	10~20 <sup>[159],[160]</sup>	/	5~15	20 <sup>[53]</sup>	/	无需 电 池 <sup>[163]</sup>
	可 靠 性	/	/	≥ 99.9999 9% <sup>[33],[49],[35],[53]</sup>	/	≥ 99.9999 9% <sup>[49],[57],[31],[35]</sup>	≥ 99.9999 9%	/	/	/	/
多 元 化 服 务 评 估	定 位 精 度	10 cm	10~10 0 cm	50cm <sup>[27]</sup>	/	10~50c m	10 cm	50~100c m <sup>[27],[33]</sup>	10~100 cm	1m	1mm 体 内
	感 知/ 成 像 分 辨 率	1mm	1cm	1mm	/	1mm~1c m <sup>[31],[33]</sup>	1mm~1c m	1cm <sup>[33]</sup>	1mm	1cm	/
	安 全 容 量	M	H	H	M	H	H	H	M	M	M
	智 能 化 水 平	H	H	M	M	H	H	H	H	M	M
SAGSIN: 空天地海一体化网络, LDHMC: 远程和高移动性通信, ELPC: 极低功耗通信, H: 高重要性, M: 中等重要性											

## 第四章 6G 网络架构

随着应用需求和技术需求的不断发展，目前 5G 中的三大应用场景有望在 6G 中得到增强和扩展。此外，6G 还设想了新的应用场景，如数字孪生、通信计算感知一体化、以及分布式 AI 应用。这些新型应用场景对通信系统的 KPI 提出了更高的要求。除了显著增强 5G 的 KPI 外，通信系统还需要在定位、感知、成像、智能水平等方面获得新的能力，如图 4 所示。然而，仅靠新的空口技术很难提高这些 KPI。因此，有必要在网络体系结构层面上对整个通信网络进行革命性的改造，使之能够提供多样化的应用，降低成本和能耗。

从 1G 到 5G，通信网络架构正朝着模块化、软件化、虚拟化、云化的方向发展。5G 的关键网络架构包括网络切片、网络功能虚拟化（Network functions virtualization, NFV）、软件定义网络（Software defined network, SDN）和基于服务的架构（Service-based architecture, SBA）。这使得网络更加灵活，并在应用服务和成本等多个方面得到改善。然而，实际网络中部署这些网络架构仍然面临许多挑战。出于应用需求、技术需求和成本考虑，6G 网络架构将在 5G 网络架构进一步演进的基础上，融合新型网络架构和技术，向以下五个方向发展：1)三维多域融合组网；2)安全可靠；3)网络、感知与计算融合；4)绿色灵活轻量；5)内生 AI 智能化。图 7 总结了 6G 网络架构的发展趋势。此外，本文还提供了具有代表性的参考文献，帮助读者理解图 7 中 6G 网络架构的每个关键点对应的概念。现有的一些综述论文已经讨论了几个潜在的架构组成，但没有分析演进趋势，也没有提出任何 6G 的整体架构，例如文献 [43]、[44]、[47]、[51]、[52]、[54]、[56]。此外，现有文献[39]、[41]、[45]、[48]-[50]、[53]、[57]引入的整体 6G 网络架构无法覆盖所有设计概念。例如，Huang 等<sup>[39]</sup>忽视了增强 5G 架构、灵活、轻量化、高能效的网络、资源的深度融合和网络安全。

在这一部分，我们将首先回顾和总结 5G 网络架构的进一步演进，然后逐一全面介绍 6G 架构的发展趋势，最后提出一种可能的新型 6G 通信网络综合网络架构。

### 4.1 5G 网络架构演进

#### 4.1.1 网络功能虚拟化

传统基于固定硬件的网络部署成本高，网络灵活性低。NFV 是一种革命性的网络体系结构，它将固定网络转变为基于软件的可编程网络。它的设计理念是将软件和硬件解耦<sup>[164]</sup>。借助虚拟化技术，NFV 可以在一个或多个物理硬件资源上部署多个虚拟服务器，根据需求配置不同的服务器来执行不同的网络功能，从而为不同的应用提供网络支持。使用 NFV 实现网络虚拟化，可以显著降低硬件的设备和运维成本，提高网络运营管理效率，缩短网络服务开发周期，使网络具有灵活性和可扩展性<sup>[52]、[165]</sup>。NFV 的体系结构主要包括三个组成部分，即网络功能虚拟化基础设施（NFV infrastructure, NFVI）、虚拟化网络功能（Virtualized



network functions, VNFs) 和网络功能虚拟化管理和编排 (NFV management and orchestration, NFV-MANO) [52]。

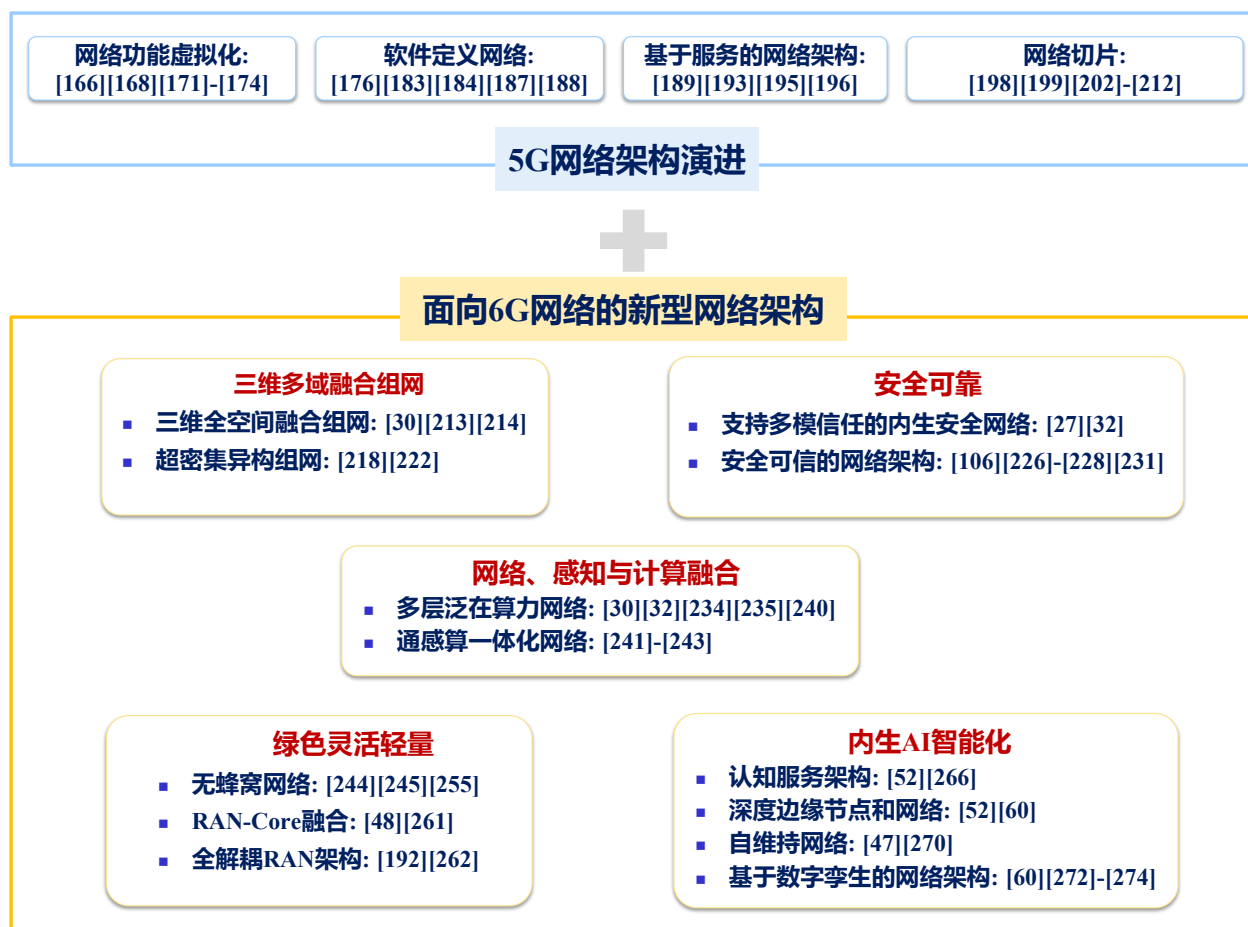


图 7 6G 网络架构发展趋势及有代表性的参考文献

2012年11月,欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)与几家电信网络运营商合作,成立了NFV行业规范小组<sup>[166]</sup>。近年来,已有大量与NFV相关的研究。NFV的相关工作按其侧重点可分为三类<sup>[166], [167]</sup>,包括NFV与其他各种网络融合的概念设计、NFV的资源分配、编排和其他算法的研究以及NFV各个方面的文献综述。

最近,也有大量关于增强NFV的研究工作。为了最大限度地减少NFV与固定网络基础设施相比在吞吐量和延迟性能方面的下降,优化和加速技术的需求应运而生。Linguaglossa等人<sup>[168]</sup>针对一系列加速技术给出了全面的概述,并得出了相应的指导方针,包括低层级硬件加速和高层级软件加速的解决方案。强化学习在文献<sup>[169]</sup>中被用来减少可编程加速器导致的异质环境中的流调度的性能下降。为了实现有效的资源管理和分配,提高运行效率并满足应用程序的高延迟要求,Kianpisheh等人提出了一种新的解决方案。文献<sup>[170]</sup>中提出了一种基于并行VNF进程的联合访问控制和资源分配算法。ETSI成立的体验网络智能(Experiential Networked Intelligence, ENI)工作组致力于在动态需求和环境中使用AI和ML技术来调整和优化VNF<sup>[54]</sup>。网络安全也是使用NFV时需要考虑的一个重要问题。

Pattaranantakul 等人<sup>[165]</sup>根据已建立的威胁分类和分析，提出了一套保护基于 NFV 服务的建议，并讨论了最新的安全对策。文献[171]对 NFV 中虚拟网络与硬件设备的映射、路由策略、安全防御等问题进行了联合研究。

除了上述软件优化和加速、功率分配、访问管理、安全等，NFV 还面临着诸多其他研究挑战，如系统复杂性、云原生 NFV-MANO<sup>[172]</sup>、网络编程和自动化<sup>[166]</sup>、众包边缘 NFV<sup>[173]</sup>中的服务质量和数据隐私以及边缘云虚拟化技术<sup>[174]</sup>。在后 5G (Beyond 5G, B5G) 和 6G 真实网络中要真正部署和增强 NFV，还有很长的路要走。

#### 4.1.2 软件定义网络

不同于 NFV 中的软硬件解耦，SDN 基于控制平面和转发平面解耦的思想，旨在将网络控制功能与转发功能分离<sup>[52], [175], [176]</sup>。SDN 体系结构主要包括应用平面、控制平面和数据(转发)平面<sup>[175]</sup>。在 SDN 中，软件定义的逻辑网络抽象于物理网络。网络控制功能集中到 SDN 控制器，SDN 控制器与上层应用程序链接，并由仅保留转发功能的下层网络基础设施完成转发操作。SDN 使每一层都相对独立，这使得 SDN 具有可编程性、灵活性、低成本和高效率<sup>[52], [54], [177]</sup>等一系列优势。

自 SDN 概念提出以来，关于 SDN 实现和增强的各个方面的研究都取得了很大的进展。由于光设备的异构性和复杂性，传送网可能是完全实现 SDN 的最后部分。文献[178]对运输 SDN 的现状和未来方向进行了全面调查。此外，SDN 还被研究用于与各种其他通信网络集成，例如智能电网通信<sup>[179]</sup>、水下无线传感器网络<sup>[180]</sup>、卫星网络<sup>[181]</sup>和车载网络<sup>[182]</sup>。在文献[177]中，作者提出将 SDN 与边缘计算和区块链相结合，以提高无线网络虚拟化的效率和安全性。对于其他更深入的算法研究，Das 等人<sup>[175]</sup>全面回顾了 SDN 控制器放置问题。该问题是影响网络延迟、恢复能力、EE 和负载平衡的网络设计关键因素。文献[183]对分布式 SDN 中的控制器同步问题进行了量化和分析。此外，SDN 的逻辑集中控制、网络全局视角、动态资源分配等特点也为实现网络智能化带来了机遇。Xie 等人<sup>[184]</sup>概述了将 ML 技术应用于 SDN 的研究问题和挑战。需要注意的是，虽然 SDN 具有可编程性、灵活性和开放性的优势，但它也会导致容易被忽视的新的安全问题。根据 STRIDE 威胁模型<sup>[185]</sup>，文献[176]对 SDN 中的典型安全问题和解决方案进行了详细的回顾和分析。

此外，为了充分利用 SDN，在 6G 中部署 SDN 的挑战包括混合 SDN 中的交换转发方案<sup>[186]</sup>、SDN 中的服务虚拟化和流量管理<sup>[187]</sup>、能效优化<sup>[181]</sup>、切换方案<sup>[182]</sup>和针对 SDN 中的多径传输控制协议 (Transmission control protocol, TCP) 的新鲜度感知年龄优化<sup>[188]</sup>。

#### 4.1.3 基于服务的架构

随着移动通信的发展，为了支持各种应用，核心网需要执行越来越多的功能，因此其变得越来越复杂。然而，不同的应用可能只需要使用部分网络功能。基于云计算、虚拟化、微

服务等技术，5G 核心网采用 SBA 的方案已被 3GPP 接受<sup>[189]</sup>。连接在一起并提供每种服务的网元是提供核心网络服务的独立模块。根据应用业务的需要，使用不同的业务网络功能模块进行部署。SBA 通过 NFV 以业务功能链的形式实现了 5G 核心网功能的模块化。5G 核心网的 SBA 和模块功能的详细信息可以在文献[52]、[190]、[191]中找到。与 SDN 中控制功能解耦的设计理念类似，SBA 中的 5G 核心网功能被分为两类，包括控制面功能和用户面功能<sup>[192]</sup>。除了 SBA 最初带来的灵活和模块化的特性外，此架构还继承了底层技术<sup>[52]、[193]</sup>的优势，包括云计算的按需计算、虚拟化的灵活高效的资源管理、灵活性、细粒度特性、微服务的独立可伸缩性。在文献[193]中讨论了 SBA 中的安全概念、技术和挑战。文献[194]在 NFV 环境下对 SBA 核心网进行了原型设计，提出了一种能够显著降低控制平面延迟的负载均衡策略。

但是仅在核心网络上使用 SBA 不足以最大限度地发挥 SBA 的优势。目前研究集中在如何在核心网中实际部署 SBA 的同时，也包括 SBA 在 6G 网络中的进一步演进趋势。未来的 6G 通信网络将在 5G 核心网使用 SBA 的基础上进行扩展，并进一步实现 E2E 网络的 SBA。在文献[195]中，Zeydan 等人探讨了 SBA 在无线接入网（Radio access network, RAN）中的应用潜力，并介绍了基于业务的 RAN 的设计思想和实现细节。RAN 侧网络业务的定义、业务模块之间的接口等细节还有待进一步研究。Zeydan 等也在文献[196]中提出了一种整体的 E2E SBA，将 SBA 的设计理念扩展到接入网和用户平面，并将其应用于空-天-地一体化网络，同时对整体 SBA 相关协议的演进和仿真进行了讨论和分析。为了更有效地将 SBA 应用于各种网络，需要根据具体情况对 SBA 进行增强。展望 6G 愿景，一个更灵活、全覆盖、全应用的整体 SBA 是下一代网络架构的潜在候选技术。

#### 4.1.4 网络切片

5G 时代，通信系统有 eMBB、uRLLC、mMTC 三种场景。这些场景的网络要求区别很大。为支持不同的应用服务，通信网络需要足够的灵活性。在考虑成本的情况下，需要最大限度地提供高质量的各种服务。这些因素导致基于 NFV、SDN、云计算和边缘计算的网路切片应运而生<sup>[197]</sup>。网络切片的核心概念是将在同一物理网络基础设施上虚拟的独立逻辑网络进行多路复用，以支持不同的应用服务<sup>[52]、[198]、[199]</sup>。除了直接向客户提供服务外，5G 网络片还提供一系列面向企业的服务，如云游戏、电力、医疗、港口和工业。截至当前，已经存在一些关于先进网络切片的调研<sup>[197]-[201]</sup>。例如，文献[198]的作者从分类、要求和研究挑战方面回顾了当前的网络切片研究。Debbabi 等人<sup>[199]</sup>研究了网络切片的体系结构，并从算法的角度对其进行了分析和概述。

作为 5G 的关键网络范式，网络分片带来了诸多优势，但是 5G 网络切片的 E2E 完整性、切片专业化水平、智能化水平仍然有限。

未来网络切片将主要向三个方向进一步发展。首先，研究重点是实现整体的 E2E 网络切片系统。文献[202]提出了一种下一代无线通信网络体系结构，该体系结构包含云、RAN 和

应用三个层次的切片。Khan 等人<sup>[203]</sup>提出了一个 E2E 网络切片框架，包括 5G 车辆 Ad-Hoc 网络的 RAN 和核心网络切片。文献[204]研究了一个 E2E 网络切片系统架构，包括 RAN、传输网络和核心网络。文献[204]还展示了所提架构的软件模拟和实际硬件演示。其次，专业或定制的网络切片也是演进的方向。文献[48]提出新设想随着未来分片和虚拟化的进一步发展，网络切片将变得高度专业化。此外，Cao 等人<sup>[205]</sup>提出了 TailoredSlice-6G 算法，该算法可以实现 6G 网络中切片的定制资源分配，提供定制的切片。在文献[206]中，作者提出了一种两级软定制的 RAN 切片方案，它可以同时满足 uRLLC 和 eMBB 业务的 QoS 要求。最后，越来越多的研究利用人工智能<sup>[207]</sup>、数字孪生<sup>[208]</sup>和深度强化学习（Deep reinforcement learning, DRL）<sup>[209]-[211]</sup>实现智能网络切片。在文献[207]中，作者提出了一种人工智能辅助下基于网络切片的下一代 RAN 功能架构，借助人工智能辅助调整网络拓扑结构、网络协议和资源管理。Wang 等人<sup>[208]</sup>基于新的图神经网络模型，提出了一个可扩展的网络切片数字孪生体，可以准确反映网络行为。并且可以预测未知环境下 E2E 切片的性能，并提供智能网络切片管理。文献[209]的作者提出了一个新颖的分层 DRL 框架，该框架结合了修正的深度确定策略梯度（Deep deterministic policy gradient, DDPG）算法，以最大化服务的长期 QoS 和网络切片的 SE。在文献[210]和[211]中，作者探讨了 DRL 分别用于自适应学习最优切片策略和寻找最优资源分配策略。此外，诸如切片隔离、动态切片创建和管理<sup>[52]</sup>、多租户网络<sup>[212]</sup>等挑战也是非常热门的网络切片研究课题。由此可以预见，未来各种应用网络切片技术将给我们的生活带来质的飞跃。

## 4.2 6G 网络架构发展方向

### 4.2.1 三维多域融合组网

5G 网络以及前几代通信网络主要侧重于部署网络接入点，为地面的通信设备提供连接。然而，偏远地区的通信受到了低无线覆盖的限制。此外，仅依靠地面通信网络的通信系统鲁棒性差，在发生各种灾害时及时通信无法得到保障。因此，6G 网络将是一个与超密集的地面异构通信网络深度融合的三维全空间网络。

三维全空间融合组网：未来的三维全空间综合通信网络是一个三维分层、综合、合作的网络，它建立在地面网络的基础上，扩展到天基网络、空中网络、海上网络、水下网络<sup>[30]</sup>、<sup>[213]</sup>，以及地下网络。通过各种扩展网络，6G 全空间综合网络可以灵活配置，并具有高弹性的优势<sup>[32]</sup>。例如，天基网络可以被部署为帮助地面基站接入核心网络的扩展回程网络，或者作为具有基站功能的节点<sup>[30]</sup>。此外，也可以启用天基扩展网络以承载地面核心网络的部分功能，如接入和移动管理功能（Access and mobility management function, AMF）、用户面功能（User plane function, UPF）和会话管理功能（Session management function, SMF）<sup>[30]</sup>、<sup>[51]</sup>。除了这些高灵活性和高弹性的优点外，三维全空间综合网络架构还具有提高通信覆盖率、快速部署和降低边缘地区的网络运营成本的优点<sup>[49]</sup>，以及网络全球化带来的按需动态资源分配

的优点<sup>[51]</sup>。

目前，关于三维空天地海一体化网络的研究受到广泛关注，并取得了一些进展<sup>[213]-[217]</sup>。但是，三维全空间网络架构的构建仍然面临着一系列的挑战，这一点将在后文中讨论。

超密集异构网络 (*Ultra-dense heterogeneous network, UDHN*)：在 5G 中，为了满足网络的各种需求，学者们研究了超密集网络来整合各种使能技术<sup>[218]</sup>。随着多样化的通信技术和各种网络的发展，以及各种应用对通信密度需求的增加，超密集异构网络将仍是 6G 的主要发展趋势之一。各种网络将继续深化整合，结合最新的技术，形成多层的 UDHN，这可以提高网络的整体 QoS，降低成本<sup>[43]</sup>。

近年来，由 UDN 和各种网络的异质性引发的问题一直是研究的重点。最近，在解决这些问题方面已取得了一些新的进展。文献[219]提出了一个为 UDHNs 覆盖率和系统吞吐量的自我优化方案。文献[220]研究了 UDHNs 中的自适应小区选择方法。Sun 等人<sup>[221]</sup>研究了考虑用户移动趋势的 UDHNs 的协同多点技术 (Coordinated multiple points, CoMP) 交接方案。此外，随着人工智能的不断发展，新的智能方法，如 ML 和深度学习 (Deep learning, DL) 也被用于解决超密集网络的典型问题<sup>[222]-[224]</sup>。

## 4.2.2 安全和可信度

在 6G 通信网络中，创新网络架构以满足各种应用需求是关键，但安全和可信度也是不可忽视的重要方面。一方面，通信技术与数据技术、工业运营技术的融合，以及设施的边缘化、虚拟化，将导致 6G 网络安全边界更加模糊。因此，传统的安全信任模式已经不能满足 6G 安全可信的要求<sup>[32]</sup>。另一方面，随着网络架构的变化和新业务、新终端的出现，6G 网络将面临新的安全威胁<sup>[30], [52]</sup>，如数据隐私问题、模型沙盘算法的安全风险，以及软件或系统漏洞。新的 6G 网络架构应基于更具包容性的多模信任模型，在网络设计之初就考虑到安全问题，以实现内生的安全和可信性。

支持多模信任的安全网络：目前的通信系统主要采用中心化的桥梁信任模式<sup>[27]</sup>。然而，不同应用场景对安全的要求和侧重通常是不同的。Porambage 等人<sup>[106]</sup>全面总结了主要 6G 应用中对安全的关键要求。6G 应用场景的多样性使得传统的安全信任模式面临诸多挑战。有必要建立一个多边信任模型，以覆盖不同情况下的信任度，并内生地承载一个更稳健、更智能、可扩展的安全机制<sup>[27], [32]</sup>。支持多边信任的网络包括三种模式的信任模型：桥梁、共识和认可。多边信任的核心是各方的去中心化共识，包括中心化的授权桥梁和第三方背书的模式。关于这三种信任模式的详细介绍可参见文献[27]。这三种信任模式相互关联，使多边信任模式更具包容性。

安全可信的网络架构：在图 7 中，我们从多个方面总结了 6G 网络架构的演变和发展方向。值得注意的是不断发展的通信网络架构也面临着新的安全威胁。在文献[106]中，作者分析了几种潜在的 6G 网络架构中的安全威胁，具体包括 RAN-核心融合、智能网络管理和调

度、边缘智能和专业 6G 网络中的安全威胁。所以在设计 6G 网络架构时，引入了潜在的 6G 安全技术以确保网络安全，如区块链技术<sup>[225], [226]</sup>、量子通信<sup>[227]</sup>和物理层安全技术<sup>[228]</sup>。O-RAN 中具有高度模块化的标准化开放网络接口也为提高网络安全提供了一些新的思路<sup>[229]</sup>。网络安全将从传统的安全保护逐步发展到具有自适应、自主、自我成长的安全能力的内生性安全<sup>[30]</sup>。文献[230]介绍了其基本概念、问题、属性、结构和功能应用。此外，Wang 等人<sup>[231]</sup>从理论和模拟的角度分析和应用了内生安全原理。除了安全技术的挑战外，安全架构和网络架构的综合演进设计也是实现内生性安全可靠网络架构的关键<sup>[32]</sup>。需要同时考虑通信和安全，并在成本和收益之间做出最佳权衡。

### 4.2.3 网络、感知与计算融合

5G 网络架构引入了移动边缘计算，以减少服务延迟和回程成本，并缓解流量压力。为了实现全面应用的愿景，满足轻量级和动态计算的要求，6G 时代的通信、计算和感知功能将被深度整合。每个网络节点都将具备数据传输、计算和感知的功能，为各种 6G 应用场景提供更好的服务。

多层泛在算力网络：云计算和边缘计算提高了网络性能，并支持了一系列新颖的服务和应用。一方面，云计算将资源和管理集中在云端，为终端设备和用户提供灵活按需的资源分配、更少的管理负担、灵活的定价模式、便捷的应用和服务提供<sup>[232]</sup>。另一方面，边缘计算满足了时间关键型应用的网络要求。雾计算的引入将云计算和边缘计算结合，形成一个集成的多层计算网络，可以灵活地处理各种网络中的计算任务<sup>[52], [232], [233]</sup>。随着计算技术的不断发展，在 6G 时代，包括云计算中心、接入网、承载网、核心网、终端等在内的网络节点将具备一定的计算资源和能力。这些不同的计算资源将以网络化的方式进行连接和协调，形成多层次的云-雾-边-端泛在计算网络，可以实现计算服务的按需调度和高效共享<sup>[30], [32]</sup>。

目前，关于这个主题的几个前瞻性研究已经初步展开。在文献[234]、文献[235]中，中国移动和中国联通已经开展了计算网络的概念研究。基于云-雾-边协作网络，Refat 等人<sup>[236]</sup>提出一个灵活的移动语法教学工具。文献[237]基于排队理论研究了三层云-雾-边缘计算基础设施的性能评估和优化。文献[233]提出了一个移动性驱动的实时云-雾-边缘协作框架。该框架可以基于用户移动性预测和智能决策，有效地将处理过的信息传递给用户设备。此外，计算网络中的研究问题也引起了业界的关注。为实现计算网络中更好的资源分配，文献[238]提出了一种基于效用优化的带宽分配方法。文献[239]研究了基站的休眠机制，同时采用了联合云边缘计算模型来提高系统的计算性能。此外，ITU-T 第 13 研究组通过了 ITU-T-Y.2501<sup>[240]</sup>标准，定义了计算能力网络框架和架构。目前，产业界正在从计算和网络的划分方案向协作方案转变，并且正在整合计算和网络<sup>[32]</sup>。值得注意的是，多层泛在计算网络还存在很多挑战<sup>[30]</sup>，包括云雾边缘计算的理论研究、不同场景下的计算资源需求、计算能力的感知和测量，以及从实际网络部署的角度看计算网络运行管理与控制、多方合作、运行模式等。

通感算一体化网络：除了数据传输和计算能力外，除了数据传输和计算能力外，6G 网络中的每个节点都将具有一定的感知能力，以满足各种新的 6G 应用服务，这些服务需要感知、成像、定位等能力，如高精度定位、测绘和重建，以及手势/动作识别<sup>[27]</sup>。因此，6G 网络将演变为通信、感知和计算的综合网络，即具有物理数字空间感知和具有普适性的网络智能通信和计算能力的综合网络<sup>[241]</sup>。多层云边缘终端计算网络将按需提供计算资源的实时调度和高效共享，为 ISAC 业务功能服务。综合网络的架构由分布式终端、边缘网和核心云网三层组成。通信、感知、计算资源深度融合、互利共赢，为智能交通、无人机网络、空、地、海一体化网络、环境探测、元宇宙等新型智能应用提供高效服务。

目前，通信、感知、计算一体化网络的研究还处于初级阶段，已有研究主要集中在概念和需求上。2021 年，文献<sup>[242]</sup>、<sup>[243]</sup>提出了联合通信、感知和计算支持的 6G 智能网络的概念，并概述了其应用需求和网络架构。2022 年，中国通信研究院发布了第一份“通信感知、计算融合网络”白皮书<sup>[241]</sup>，明确了应用场景和需求，分析了使能技术，预测了向智能化演进的方向。后文将讨论相关的挑战。

#### 4.2.4 绿色灵活轻量

实现绿色、灵活、轻量化是网络架构发展的持续趋势。这也是动态、灵活分配网络资源、提高网络效率、降低网络部署和运营成本的关键。除了 5G 灵活的网络切片，6G 的网络架构将变得更绿色、更灵活、更轻量，使用无蜂窝网络、RAN-Core 融合和全解耦 RAN 架构和其他未来关键技术。

无蜂窝网络：从 5G 开始，通信系统的性能受到传统小区架构边界效应的很大限制。边界效应是指在小区边缘存在通信质量差、来自其他用户的强烈干扰的现象。传统的蜂窝网络结构需要复杂的协同处理和高昂的部署成本，这使得现有技术缓解边界效应方面的能力极其有限。此外，负载均衡、干扰管理、切换开销等问题也是传统蜂窝架构中非常棘手的问题<sup>[52]</sup>。为了解决这些挑战，大规模 MIMO 的无蜂窝网络架构应运而生，并迅速成为研究的焦点<sup>[244]-[255]</sup>。2016 年，华为<sup>[256]</sup>展示了一个以用户为中心的无单元架构，其核心思路与无蜂窝网络相似。在无蜂窝网络架构中，区域划分不再基于蜂窝网格。海量 MIMO 天线阵列和接入点在地表上大面积分布，由统一的中央处理单元（Central processing units, CPUs）控制，共同为具有相同资源的用户终端服务。无蜂窝大规模 MIMO 架构由于其具有高网络覆盖、低成本、高宏分集增益、低路径损耗以及巨大的频谱效率和能量效率<sup>[52]</sup>等优势，在下一代系统中很有前景<sup>[246]</sup>。

自从无蜂窝结构在文献<sup>[244]</sup>中被提出以来，学者们已经针对其优点的验证进行了广泛的研究。在文献<sup>[257]</sup>中，作者分析了无蜂窝大规模 MIMO 系统的频谱效率和能量效率。其结果表明无蜂窝架构可以通过更环保的方式提供相同的服务质量。在文献<sup>[258]</sup>中作者也发现了类似的结论。此外，由于无蜂窝网络的事实通过接入点为用户服务，网络部署可以更加

灵活<sup>[245], [255]</sup>。因此，其潜在的优势引起了近年来对无蜂窝网络的大量研究。文献[247]关注硬件损坏的影响，研究分析了计算复杂度低的可伸缩无单元系统性能。基于相位漂移和相位漂移的影响分析，文献[248]研究了非理想硬件在无蜂窝系统上的噪声对系统性能的影响。为了提高动态无蜂窝大规模 MIMO 网络中的传输可靠性，作者在文献[249]提出了一种基于学习的能量延迟感知功率控制策略。文献[250]研究了无蜂窝系统中的信道估计方法，提出了一种基于指纹定位的高精度信道协方差矩阵估计方案。除了无蜂窝系统的理论研究外，研究还集中在无蜂窝网络与其他技术的集成上。在文献[251]中提出并分析了全双工无蜂窝大规模 MIMO 系统，该系统可以充分利用全双工通信的总吞吐量和 EE 优势。文献[252]基于无蜂窝大规模 MIMO 网络，提出了一种新的无线环境联邦学习框架。到目前为止，无蜂窝架构已应用于许多新的通信场景，包括毫米波通信<sup>[253]</sup>、VLC<sup>[259]</sup>、卫星和无人机通信<sup>[260]</sup>以及室内工厂环境中的通信<sup>[254]</sup>。要使无蜂窝/少蜂窝架构成为现实，仍有许多问题有待探索。文献[255]全面回顾了无蜂窝大规模 MIMO 网络的主要研究挑战和机遇，包括前传链路、信道状态信息（Channel state information, CSI）估计和资源分配等问题。

**RAN-core 融合：**目前，通信网络的核心功能趋于分散，而更高级别的 RAN 功能趋于集中。为了使 6G 网络更加轻量化和灵活，贝尔实验室<sup>[48], [261]</sup>提出了一种新颖的网络架构概念 RAN-core 收敛，即部分 RAN 架构（集中式高级 RAN）和部分核心网（下沉边缘核心网）可以统一为单个实体。一方面，可以降低网络的复杂性和传输成本；另一方面，RAN 端网元的可伸缩性将得到提高。需要注意的是，RAN-Core 融合网络架构中的网络分解、不同网络之间协议套件的协调等问题还需要进一步的研究<sup>[48]</sup>。

**完全解耦的 RAN 架构：**从 4G 到 5G，核心网的架构设计实现了控制平面与用户平面的分离，提高了网络的灵活性。但在 5G 的 RAN 端，每个基站仍需配备控制功能和用户平面功能（如数据传输功能）<sup>[262]</sup>。因此，网络架构仍有优化的空间。文献[192]和[262]提出了一种完全解耦 RAN 端的新体系结构，并讨论了该系统在 EE、可靠性、移动性和灵活性等方面的优势。在完全解耦的 RAN 架构中，基站分为控制基站和数据基站，分别执行控制和数据传输功能。控制基站通常是大范围的宏小区基站，而数据基站则是微小区基站。通过将 2G/3G 网络基础设施或频谱资源复用，终端可以通过低频控制信道和控制基站传输控制信号，提高频谱利用率，使网络更加灵活。此外，该体系结构也考虑了资源分配和功耗。值得注意的是，仅仅通过分离控制基站和数据基站并不能实现完全解耦，负责上行和下行传输的数据基站也需要完全分离。这样，控制基站可以更准确地协调频谱资源，也会减少用户之间的干扰。此外，将上行和下行基站分离，部署更少的下行基站，服务更大的区域，可以降低网络和终端的功耗，使网络更绿色、更节能。关于完全解耦的 RAN 架构的设计概念的详细信息可以在文献[192]中找到。最近，文献[263]研究了完全解耦 RAN 架构中的上行联合基站接收问题，设计了一种基于频谱效率最大化的有效的并行上行基站选择策略。然而，目前对完全解耦的 RAN 架构的研究还处于早期阶段。



## 4.2.5 内生 AI 智能化

人们普遍认为 6G 将更加智能。在 5G 时代, 已经存在提高网络智能水平的研究。5G 核心网增加了网络数据分析功能 (Network data analysis function, NWDAF), 提高了网络的数据采集和分析能力。但是, 由于数据源有限, 缺乏数据隐私保护和对外部 AI 服务的支持, NWDAF 无法为网络提供原生 AI 支持。随着 AI 技术 (包括 DL<sup>[264]</sup>、强化学习和联邦学习) 的快速发展, 以及网络节点通信、计算、感知等综合能力的增强, 6G 网络将支持原生 AI 智能。需要指出的是两个不同的概念<sup>[265]</sup>, 即 AI for network 和 network for AI。一方面, AI for network 应用新型人工智能技术进行网络规划、维护和优化, 实现网络的自运行、自维护、自修复能力; 另一方面, 具有原生智能的网络将能够为用户提供更智能的 AI 应用服务 (Network for AI)。目前, 越来越多的研究焦点集中在原生智能网络架构, 如认知服务架构、深度边缘节点与网络 (Deep edge nodes and networks, DEN<sup>2</sup>)、自维持网络 (Self-sustaining networks, SSNs) 和基于数字孪生的网络架构。这些技术将有助于实现原生智能 6G 网络。

**认知服务架构:** 从 5G 到 6G 出现了丰富的应用场景。这意味着改变服务场景、个性化用户需求和改变业务需求。这些因素反过来又要求 6G 网络足够灵活。虽然基于 SBA 的模块化 5G 核心网可以根据业务需求使用不同的网络模块进行部署, 但 5G 核心网中的 SBA 配置粗糙, 缺乏对业务需求变化的实时感知和动态适应能力<sup>[52]</sup>。在文献[52]中, 提出了一种新颖的认知服务架构, 该架构具有准确识别目标行为、场景语义和用户特征的能力, 以及统一的服务描述方法。最近, 在文献[266]中详细描述了认知服务架构的设计概念和实现细节。为了实现网络的认知功能, 将传统网络服务升级为认知服务, 在基本网络功能的基础上增加实时感知和 AI 推理能力。一方面, 升级后的 SBA 可以实时感知请求流、资源和拓扑状态、运维事件等网络状态; 另一方面, 利用 AI 的智能能力可以实现网络的在线特征匹配和局部推理功能。网络功能和接口认知能力的更新是通过认知服务知识图谱的更新来实现的。此外, 认知服务架构还引入了 AI, 为 6G 核心网的智能资源调度功能模块赋能, 提升网络的整体性能, 更多细节可以在文献[266]中找到。文献[266]除了研究认知服务架构的设计概念外, 还通过会话建立过程对认知服务架构进行了案例研究。结果表明, 认知服务架构可以简化网络功能与网络服务知识图的交互过程, 从而提高系统的性能。为了实现认知服务架构, 需要关注统一的网络语义、支持认知服务的多态接口、服务连续性保证、计算网络集成的通用平台等各种使能技术。

**DEN<sup>2</sup>:** 未来, 6G 将服务于需要极致性能和本地数据处理的新型行业场景。为此, 预计 6G 将在边缘部署通信服务和智能, 以逐步实现网络的普适智能。DEN<sup>2</sup> 是在文献[52]中提出的, 它的基本概念是由协作和可控的深层边缘节点实体组成的大规模网络, 这些实体提供通信服务、智能和计算等。文献[60]提出了一个类似的概念, 称为连接人工智能。文献[52]给出了 DEN<sup>2</sup> 的体系结构示意图, 包括 DEN<sup>2</sup> 的运行体系结构、DEN<sup>2</sup> 控制与管理体系统结构和组网体系结构。从推动深度边缘节点智能化的角度来看, DEN<sup>2</sup> 的关键功能是支持原生 AI, 包

括数据访问、存储、处理、推理和知识分发<sup>[52]</sup>。通过深度边缘节点的组网，DEN<sup>2</sup>可以促进通信、计算等资源的整合，充分利用这些资源，进一步提升 6G 网络的智能化水平。

**SSN:** 为了提高网络部署、管理和维护的效率，降低网络运营成本，学者提出了追求网络管理部署和管理自动化的自组织网络（Self-organizing network, SON），其近年来备受关注<sup>[267]-[269]</sup>。然而，6G 的潜在范式转变是从 SON 到 SSN，因为 SON 仅限于使其功能适应特定的环境条件<sup>[47]</sup>，而 SSN 的主要特征是能够在高度动态和复杂的环境（包括未知环境）中自我维持并永久保持网络的性能。

到目前为止，对于 SSN 的研究还处于起步阶段，一些研究已经集中在 RAN 侧的 SSN。在传统的网络切片中，网络只针对特定场景执行操作，解决不可预见的网络情况和问题总是需要人工干预<sup>[270]</sup>。为了应对这一挑战，在文献<sup>[270]</sup>中，Mei 等人提出了一种智能化的自维持 RAN 切片架构。在人工智能技术的驱动下，自维持 RAN 切片架构结合了多粒度网络资源的自我管理、切片控制性能的自我优化和自学习以及不可预测的网络条件下的自适应控制策略。它可以在不同的网络条件下自主地保持各种业务的高服务质量性能。此外，文献<sup>[270]</sup>的作者还尝试将所提出的自维持 RAN 切片架构应用于车载网络，并通过案例研究说明了自维持 RAN 切片架构具有灵活性、自学习和快速自动调整的优点。随着 AI 技术的进一步发展和网络智能化的提高，未来的 6G 网络将从 RAN 端进一步发展，并逐步实现 E2E 单点通信。

**基于数字孪生的网络架构:** 6G 网络将是一个内生安全的泛在网络，提供极致的网络体验，支持多样化的应用场景，覆盖所有场景。为了实现 6G 愿景，网络架构需要在多方面进行创新。然而，传统的网络优化和创新往往依赖于物理网络，耗时长，实施成本高。为了使网络更高效地演进，近年来，数字孪生<sup>[271]-[274]</sup>的概念被应用到通信网络的创新和演进中。这为提升 6G 网络的 SE、EE、智能、安全等各项 KPI 带来了新的机遇和方法。数字孪生由 Michael Grieves 于 2003 年首次提出<sup>[271]</sup>，它被定义为物理产品、虚拟产品以及它们之间的联系。随着建模和仿真技术的不断进步，数字孪生正逐步应用于制造业、航空、医疗保健和 6G 网络等各个行业<sup>[272]</sup>。在文献<sup>[273]</sup>中，作者讨论了数字孪生与 6G 的关系。一方面，更先进、更智能的 6G 可以促进数字孪生在各个行业的实现和应用。另一方面，智能数字孪生也可以方便 6G 网络的设计、部署、运营和维护。到目前为止，数字孪生在 6G 网络中的应用研究还处于初期阶段，具有多种多样的定义或实现方式<sup>[60]</sup>。公认的基于数字孪生网络体系结构的设计概念是指构建在真实物理网络上的虚拟数字孪生网络，并且它们以交互方式实时映射。孪生网络通过闭环仿真和优化实现对物理网络的映射和控制。数字孪生可以为真实的 6G 网络的部署、管理和运营提供指导，提高 6G 网络的自主性和自动化水平<sup>[32], [273], [274]</sup>。

基于数字孪生的网络体系结构备受关注，近年来涌现出大量的研究成果。在文献<sup>[262]</sup>和<sup>[275]</sup>中，作者提出了一种基于赛博孪生的网络架构，其中托管在网络边缘的终端用户数字赛博孪生体可以提供三大功能：通信辅助、网络行为日志和数字资产所有权。在此基础上，Li 等<sup>[276]</sup>研究了基于赛博孪生的 6G 核心网中联合虚拟网络拓扑的设计与嵌入。为促进以用户为中心的网络，Shen 等人<sup>[60]</sup>提出了一种融合网络切片和人工智能的数字孪生网络体系结构。

该框架可以实现细粒度、灵活的网络管理。在文献[277]中，作者建立了物理网络的虚拟数字孪生实例，以实时捕获 NFV 环境中异常和故障之间的依赖关系。仿真结果证明了数字孪生在帮助分析并定位 NFV 环境中导致异常的根本原因方面的有效性和优势。Nacem 等人<sup>[278]</sup>使用数字孪生来帮助优化分配网络切片资源。他们利用图形来构建网络切片的数字孪生，并尝试使用图形神经网络来学习网络切片的复杂关系。基于数字孪生的网络状态最终可以被转到文献[278]提出的深度分布式 Q 网络，以学习最优的网络切片策略。此外，其他一些工作集中在数字孪生辅助边缘网络中的问题，如数字孪生在物联网设备智能计算任务的分流中的应用以及移动边缘服务器的选择<sup>[279]</sup>、<sup>[280]</sup>，数字双边缘网络的通信效率和数据隐私保护<sup>[281]</sup>，以及边缘关联的优化问题<sup>[282]</sup>、<sup>[283]</sup>。

由此可见，目前对 6G 网络中数字孪生的研究还处于初期阶段，主要涉及数字孪生在 6G 网络某些部分的应用。由于 6G 网络的复杂性，利用数字孪生网络研究整体 6G 网络架构确实是一项非常巨大和复杂的任务。值得注意的是，在数字孪生加速 6G 网络发展的同时，实时数字孪生网络系统的建设也对网络的数据速率、可靠性、时延等 KPI 提出了更高的要求。因此，6G 网络和数字孪生将融合、相互促进、共同发展。

### 4.3 6G 新型网络架构

为了实现 6G 愿景，满足 6G KPI，服务于多样化的新应用场景，6G 网络架构将进行全面创新。在 5G 网络架构进一步演进的基础上，6G 网络架构将朝着图 7 所示的五个方向发展。在这一部分中，我们提出了一种新颖的 6G 通信网络综合网络架构，如图 8 所示。该架构将多个潜在的未来网络技术/组件连接到一个统一的框架中。由于未来的 6G 网络将是各种网络的异质融合已成为共识，因此我们提出的架构概念类似于几个白皮书和项目中的概念，例如文献[37]。我们的创新之处在于，提出的综合体系结构考虑了更多潜在的组件，包括分层智能多层泛在计算网络，新的灵活体系结构如无单元体系结构，以及增强网络智能的新技术，如基于数字孪生的网络体系结构。接下来，将介绍提出的 6G 新型网络架构。

首先，随着计算、存储等技术的发展，6G 网络将变得更加智能、灵活、高效、无所不在。云、雾和边缘计算将相辅相成，为网络提供按需实时调度和高效共享计算资源，这对人工智能技术应用至关重要。基于此架构，包括网络智能云平台和数据驱动的边缘智能中心在内的多层次一体化智能网络有望形成。其中，雾计算起到了桥梁的作用，连接了集中的云和分布式的边缘网络。5G 中的移动边缘计算（网络功能下沉）将继续演进，使得 6G 网络去中心化。边缘智能中心将支持一系列通信网络。与超大质量 MIMO 天线相结合的无蜂窝架构将打破传统蜂窝架构中的边界效应，给网络带来一系列的改进，包括 SE 和 EE。有趣的是，RIS 具有主动控制无线信道的能力，这将在 5.3.2 节中详细介绍。它在未来无线网络的覆盖增强和容量提高方面具有巨大的潜力。各种应用场景的通信密度逐步提高，6G 网络将是 UDHN。此外，还将深度开发和利用包括毫米波、太赫兹和 VLC 在内的全频谱资源，建设各种网络，以服务于全覆盖场景，即空间-空中-地面综合网络<sup>[284]</sup>。特别是，多个 RAN 核融合

边缘计算中心集成了高级 RAN 功能和部分下沉边缘功能，可以减少传输延迟，并可以更好地支持自动驾驶和远程医疗等具有低延迟要求的应用。在 6G 网络架构中，RAN 侧将进一步解耦，基站的控制面与用户面将进一步分离，使网络资源得到更灵活、更高效的利用。

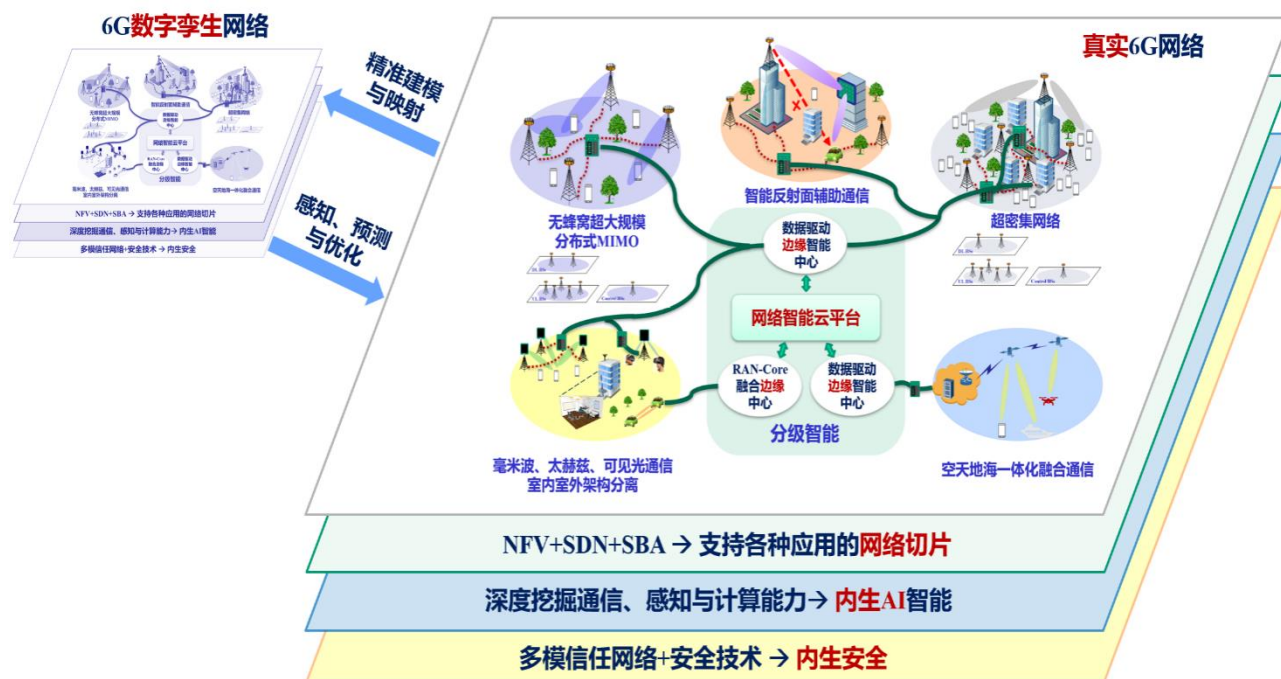


图 8 一种 6G 新型网络架构

其次，NFV、SDN 和 SBA 将继续发展和演进，为实现整体 E2E 网络分片提供源泉和动力。更重要的是，6G 网络中的网元将具有额外的计算和感知能力。通过深入挖掘通信、感知和计算能力，将有可能获得大量的训练数据和分布式计算能力。因此，一些能够提高网络智能化水平的体系结构，如认知业务体系结构、DEN<sup>2</sup> 和 SSNs 将很快成为现实。此外，6G 网络将逐步实现原生智能。从网络安全角度看，6G 网络将采用多边信任模式，将区块链技术、物理层安全等多种安全技术结合起来，实现网络的内生安全。需要注意的是，与 5G 网络中的边缘智能中心相比，6G 网络中的边缘智能中心将在各个方面得到提升。数据驱动的 6G 边缘智能中心将深度整合包括通信、感知、计算和 AI 在内的资源，具有以任务为中心的动态服务编排功能。此外，这些边缘智能中心将为 6G 的原生智能和内生安全做出贡献。

最后，在人工智能技术和通信-感知-计算一体化网络的帮助下，数字孪生将有助于推动 6G 网络架构的演进。真实的 6G 网络将精确建模以构建相应的数字孪生网络，两者将实时映射。数字孪生网络可以跟踪真实网络的变化，通过闭环仿真和优化预测网络优化方案的性能，为真实 6G 网络的部署、管理和运营提供优化指导。随着各种使能技术的发展，所提出的全面的 6G 网络架构最终将成为现实。

## 第五章 6G 关键技术

6G 描述的宏伟愿景为我们提供了未来通信系统的美好蓝图。6G 系统将采用全频段技术，为用户提供全球覆盖，并进一步扩展通信系统的内涵，实现基于安全保证的通信、感知和计算相融合的智能服务。由于现有的 5G 关键技术将不足以支持上述 6G 愿景，国内外研究机构对 6G 潜在关键技术已有一系列调研与展望。在文献[43]、[46]、[47]、[52]中，作者仅列举了一系列 6G 潜在技术，但没有对技术进行分类和梳理，因此无法提供对技术发展方向的整体理解。一些文章只研究了少数几种技术<sup>[42]、[53]</sup>，或者并没有对所提技术进行分析<sup>[41]</sup>。在文献[335]中，ITU-R 组织发布了至 2030 年甚至更远的技术发展预测，但缺乏文献和调研的支撑。此外，部分潜在关键技术，例如纳米级通讯<sup>[44]</sup>和分子通信<sup>[47]</sup>等，虽然在特定场景中具有优势，也得到了一定的关注，但由于实用性有限，因此不太可能成为 6G 关键技术。如图 9 所示，基于现有研究和相关技术的最新发展，本文筛选出 16 个潜在 6G 关键技术并将其分为四个演进方向。在表 3 中，本文还总结了一些 6G 关键技术的代表性文献综述。

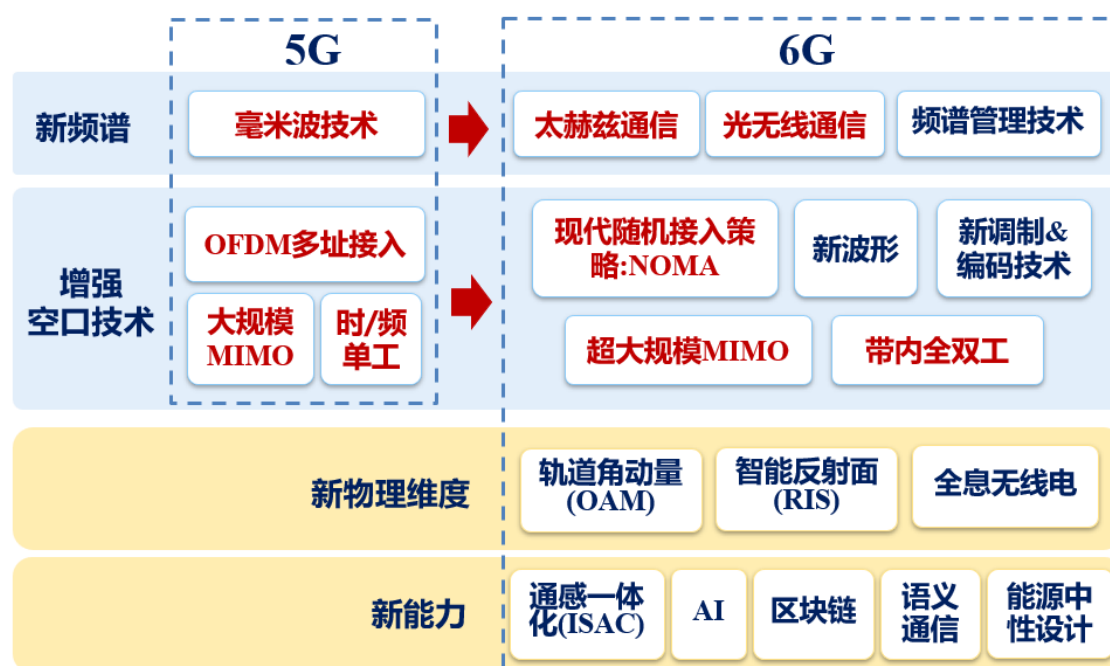


图 9 6G 潜在关键技术

部分潜在 6G 技术是 5G 关键技术的演进。5G 利用毫米波技术，而 6G 预计将引入 THz、OWC 和先进频谱管理技术以满足迅速增长的数据服务需求。5G 关键空口技术例如正交频分复用接入（Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA）、大规模 MIMO 和半双工技术将在 6G 进一步发展。NOMA、超大规模 MIMO 和带内全双工（In-band full-duplex, IBFD）等技术将继续提高通信系统能力和效率。此外，学术界和工业界积极探索新的物理维度，例如轨道角动量（Orbital angular momentum, OAM）、RIS 和全息无线电，以实现数据传输方式革命性的突破。许多新型技术将致力于扩展通信网络的功能。例如，ISAC 使通

信系统有能力融合感知功能，AI将为通信系统的各层提供颠覆性的智能解决方案，区块链有望为安全可靠通信提供保障，语义通信将探索一种新的信息提取方式以打破经典通信系统的传输瓶颈。

本小节将讨论潜在 6G 关键技术的概念、应用、发展和挑战。

## 5.1 新频谱

### 5.1.1 太赫兹通信

据预测，到 2024 年移动数据流量将增加 5 倍<sup>[285]</sup>。在前面提到的 6G 愿景下，视频业务的快速增长和 VR/AR、自动驾驶、物联网等新应用的出现，导致对高数据速率传输和低时延业务的需求不断增加<sup>[336]</sup>。大多数现有的 5G 技术尚停留在毫米波波段，只能实现最高 1 Gbps 的平均速率<sup>[285]</sup>。5G 通信系统面临着不可忽视的频谱拥塞问题，无法满足快速增长的 6G 数据业务需求。

太赫兹 (0.1-3 THz) 是毫米波和光频段之间最后一个未开发的频谱范围。太赫兹具有频率高、带宽大、路径损耗大、分子吸收严重、漫散射丰富和波束极窄等特点。尽管距离实际应用还较远，但由于太赫兹能够为超高数据速率服务提供强大的支持，被认为是 6G 最有前景的技术之一<sup>[286]</sup>。

太赫兹技术有望在通信、传感、成像和定位等应用领域发挥重要作用：1)太赫兹通信系统支持从室内到室外的高数据速率通信业务，如高清全息视频会议、超高分辨率视频格式、高清电影文件下载、VR 技术、车对车 (vehicle-to-vehicle, V2V) 通信、无线前传和回程链路以及卫星间通信等空间应用<sup>[123], [285], [286], [287]</sup>；2)太赫兹波长短，链路方向性高，天线孔径小，不易受自由空间衍射影响，可用于提高通信安全性<sup>[123], [287]</sup>；3)太赫兹技术有望应用于纳米级器件，如医疗、军事、环境污染监测和超高速片上通信<sup>[72], [123]</sup>；4)太赫兹技术能够支持通信以外的应用，例如用于爆炸探测的光谱仪、气体传感、安全人体扫描、救援和监控中的成像以及厘米级精度的定位<sup>[287], [336]</sup>。

为了使太赫兹应用成为现实，仍然需要克服许多技术瓶颈。首先，需要研发适合太赫兹传输的硬件设备，如可以产生高频电磁波的电子或光子器件、宽带和定向天线、太赫兹功率放大器<sup>[72], [337]</sup>。目前的互补金属氧化物半导体 (Complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 技术无法处理超过 300 GHz 的频率。此外，充分了解太赫兹信道的独特特性，建立准确通用的信道模型对于通信系统的设计和分析至关重要<sup>[338]</sup>。需要对太赫兹特定的空中接口技术和 MAC 协议进行进一步探索<sup>[288]-[290]</sup>。此外，还需要解决太赫兹波段严重的传播损耗和功率限制导致的通信距离缩短的问题<sup>[287], [339]</sup>。最后，需要对太赫兹频段带来的健康和安全问题进行分析和评估<sup>[285]</sup>。

2008 年，IEEE 802.15 建立了太赫兹兴趣组。2019 年，FCC 宣布对 95 GHz - 3 THz 进行为期 10 年的公开测试。2022 年，X. You 等人提出了一种光子学辅助的透明“光纤-太赫兹-



光纤”传输系统，首次打破了公开报道的太赫兹通信系统实时传输速率的世界纪录，最高传输速率超过 100 Gbps<sup>[340], [341]</sup>。全球对太赫兹的研究正在稳步发展，可以预见，在不久的将来，太赫兹辐射和探测技术的突破将给人类生活和社会发展带来重大变化。

### 5.1.2 光无线通信

在太赫兹频谱之外，使用光无线通信提供高密度宽带通信服务，具有超低时延、固有物理层安全、零电磁干扰、大量免费无授权频谱、相对较低成本、部署简单等优点，是射频无线通信系统的重要补充<sup>[4], [46], [49], [78], [342], [343]</sup>。

光学波段包括红外线（波长 760 nm ~ 1mm）、可见光（波长 360 nm ~ 760 nm）和紫外光（波长 10 nm ~ 400 nm）。红外通信系统结构简单，设备成本低，适合远距离数据传输，但容易受到雾、霾等大气影响<sup>[46]</sup>。可见光除了照明功能外，还可以用于通信、能源设施，如太阳能电池可同时用于能量收集和高速数据接收<sup>[344]</sup>。基于可见光的物联网概念在文献<sup>[345], [346]</sup>中提出。以激发荧光粉的蓝色激光为基础的新一代照明设备正在进入市场。在文献<sup>[347]</sup>中，提出了双波长（蓝色转换为白光加上红外线）系统，聚合数据速率可达 26 Gbps。与其他光带相比，紫外线具有较低的背景噪声和较强的大气散射，使其有望用于非视距（Non-line-of-sight, NLOS）链路通信<sup>[348]</sup>。然而，紫外线可能会对健康和安全产生负面影响，在实际应用前需要充分评估<sup>[349]</sup>。

近年来，光无线受到越来越多的关注，从超短距离到超长距离通信都具有广阔前景<sup>[78]</sup>。主要的光学无线技术可分为五类：VLC、LiFi、OCC、FSO 和 LiDAR。VLC 在室内、水下和车载通信以及定位系统中具有很大的应用潜力<sup>[292]</sup>。作为无线保真（Wireless fidelity, WiFi）传输技术的补充，LiFi 可以同时提供照明和多用户通信服务。由于 OCC 在 V2X 通信、室内定位、数字标牌和 VR 等方面的应用，人们对它的兴趣越来越大。FSO 通信系统用于数据中心、深空通信和 underwater 系统的高数据速率通信<sup>[350], [351]</sup>。LiDAR 作为一种引人注目的光学遥感技术，在交通运输、机载以及自动车辆通信方面具有巨大的应用潜力。

光学波段的可用频谱资源比射频波段大三个数量级。然而，光电子器件的电带宽极大地限制了光谱资源的利用。近年来，高性能光电子器件的开发一直是光学无线研究的热点。文献<sup>[352]</sup>在 VLC 系统中设计并应用了具有数百 MHz 带宽的快速有机发光二极管（Organic light emitting diode, OLED），实现了超过 1 Gbps 的数据传输速率。硅光电倍增管在误比特率（bit error rate, BER）低于 $10^{-3}$ 的可靠性保障下，实现了 3.45 Gbps 的数据传输速率<sup>[353]</sup>。信道测量和建模对于 OWC 信道的理解和链路设计至关重要。2018 年发表了 OWC 信道研究的全面综述<sup>[291]</sup>。由于 OWC 信道的各向异性，OWC 信道模型必须考虑器件方向对信道增益的影响<sup>[354], [355]</sup>。为了克服随机方向和阻塞的影响，文献<sup>[354]</sup>提出了具有自适应空间调制的多向发射机。时域空间调制被认为是下一代基于 OFDM 的光学空间调制的可行选择<sup>[356]</sup>。为了利用 VLC 系统的空间多样性，文献<sup>[357]</sup>提出一种波束转向和用户聚类场景的 NOMA 方案，

该方案可为每个 NOMA 用户对提供 10 Mbps 的和速率增益。此外，OWC 的安全性也得到了广泛的研究。在文献[358]中，针对多用户 VLC 系统提出了一种物理层安全技术。

### 5.1.3 频谱管理技术

为了解决频谱资源短缺的问题，除了在更高频率上探索未使用的频谱外，提高有限频谱的利用率也很重要。面对交通需求的高度动态性和环境依赖性，频段利用不足问题亟待解决。基于认知无线电（Cognitive radio, CR）<sup>[293]</sup>、共生无线电（Symbiotic radio, SR）<sup>[294]</sup>和动态频谱共享技术<sup>[295]</sup>的频谱管理被认为是提高 6G 通信系统 SE 和 EE 的重要方法<sup>[25]· [35]· [51], [52], [54]</sup>。

CR 的概念最早由 Joseph Mitola 在 1999 年提出<sup>[359]</sup>。2003 年，FCC 建议任何具有自适应频谱感知的无线电都应该被称为 CR。Haykin 提出了一种脑授权 CR 技术<sup>[360]</sup>，并将其定义为一种能够感知外部环境并进行相应调整的智能无线通信系统。Zhang 等人提出了基于 CR 的车辆网络<sup>[361]</sup>，该网络应用深度 Q-学习来处理由于车辆可用频谱变化而引起的高度动态拓扑。SR 作为 CR 的最新发展之一，利用 CR 和环境后向散射通信（ambient backscatter communication, AmBC）技术将信息嵌入环境 RF 信号中，实现互利的频谱共享，使二级系统能够高效地共享主系统的频谱、能量和基础设施<sup>[294]</sup>。基于 AmBC 的 SR 技术在无源物联网中很有前景，有助于频谱和节能通信设计<sup>[362], [363]</sup>。智能动态频谱共享是近年来研究的热点之一。Sharma 等人提出全双工无线技术可以同时实现感知和传输<sup>[364]</sup>，通过动态频谱共享提高频谱利用效率。Naparstek 和 Cohen 提出了一种基于深度 Q-学习的分布式动态频谱访问技术<sup>[365]</sup>。区块链支持的动态频谱共享有望改善分布、安全性和自动化，人工智能有望提高动态频谱共享中模式识别和决策的性能<sup>[366], [367]</sup>。

表 3 6G 技术的代表性综述

技术	参考文献	研究重点
太赫兹	[285]	太赫兹的标准化、场景、应用、未来研究方向及有待解决的问题
	[286]	太赫兹产生方法、信道模型、应用、标准化活动及未来展望
	[72]	太赫兹的挑战、创新性和标准化
	[287]	太赫兹传感、成像和定位应用
	[288]	太赫兹特定信号处理
	[289]	太赫兹视距 MIMO 通信
	[290]	太赫兹 MAC 协议
光无线	[78]	光无线技术总结
	[291]	光无线信道研究
	[73]	光无线混合网络
	[292]	可见光通信的概念、架构和挑战
频谱管理技术	[293]	CR 的基础、体系结构、应用和重要问题
	[294]	SR 的系统观点
	[295]	动态频谱共享的计划、挑战和路线图



新波形和新型调制技术	[296]	OTFS 的动机、特点、挑战和应用
	[297]	SEFDM 的发展历史
	[86]	ISAC 波形设计
	[298]	IM 研究进展与方向
新编码技术	[299]	信道编码的演进
	[300]	Turbo、LDPC 和 Polar 解码 ASIC 实现
现代随机接入策略	[301]	NOMA 的设计、标准化进程和用例
	[302]	NOMA 研究、创新、应用和挑战
超大规模 MIMO	[303]	超大规模 MIMO 总体研究报告
	[304]	无蜂窝大规模 MIMO 的优点、信号处理技术和研究挑战
	[255]	以用户为中心的无蜂窝大规模 MIMO 网络体系结构的现状和未来发展方向
带内全双工技术	[305]	带内全双工中继的研究现状与未来挑战
	[306]	IBFD 技术与系统综述
轨道角动量	[307]	OAM 波的产生、检测和新兴应用
	[308]	THz-OAM 光束的产生、探测技术及应用
	[309]	基于 OAM 的传感系统的见解和设计指南
智能反射面	[310]	RIS 的解决方案、研究问题、相关的通信理论模型以及性能限制
	[311]	RIS 的原理、性能评估、波束形成设计和资源管理
	[312]	基于 RIS 的智能无线电环境的研究、应用和挑战
	[313]	RIS 和中继之间的主要区别和相似之处
	[314]	RIS 综合研究报告
	[315]	RIS 的优点、原理、应用及研究方向
全息无线电	[316]	全息无线电的实现与信号处理
人工智能	[317]	无线人工智能综合研究报告
	[318]	基于人工智能的 5G 和 B5G 算法、实现和优化
	[319]	物理层 DL 的应用和开放挑战
	[320]	基于机器学习的网络拥塞控制技术与挑战
通感一体化	[321]	ISAC 整体研究报告
	[322]	实现感知移动网络的动机、方法、挑战和机遇
	[323]	联合通信和雷达传感的信号处理技术
	[85]	物联网下 ISAC 的应用、趋势和挑战
	[324]	双功能雷达通信策略及其与自动驾驶汽车的相关性
	[325]	集成定位与通信研究综述
区块链	[326]	基于区块链的无线通信的基本原理和最新进展
	[327]	区块链在无线电频谱管理中的应用
	[328]	区块链解决方案, 解决数据管理方面的挑战
	[329]	区块链用于物联网医疗保健
	[330]	区块链在车联网中的应用
	[321]	区块链在智能电网网络安全中的应用
语义通信	[332]	基于 DL 和 E2E 通信的语义通信
能源中性设计	[333]	后向散射调制概览
	[334]	后向散射通信网络中的资源分配

## 5.2 增强空口技术

### 5.2.1 新波形和新型调制技术

6G 拥有更多样、更复杂的应用场景，支持其“全覆盖、全应用、强安全、全频谱、全感官、全数字”的愿景。6G 将实现 Tbps 级的数据速率，提供密集连接，实现更广泛的覆盖范围，追求更智能、更安全的服务。这些改进对波形设计和调制提出了新的挑战。

在设计波形时，需要考虑应用场景的独特性要求，这与通信系统的性能密切相关。在制定 5G 标准的过程中，主要采用了 OFDM 等具有高 SE 但峰均比（Peak to average power ratio, PAPR）高的多载波系统。文献[27]中详细描述了更多现有的波形，为了灵活地适应 6G 通信系统可能的应用场景，新的波形设计有望有针对性地提高系统性能。与低频相比，6G 潜在的高频场景带来了更多的挑战，例如传输路径损耗大，需要高效的高频宽带功率放大器。在文献[368]中，研究了具有低峰均比的单载波系统来解决这些挑战。对于高移动性场景，变换域的波形，如正交时间频率空间调制（Orthogonal time-frequency space, OTFS），可以更准确地描述延迟和多普勒等信息<sup>[296]</sup>。对于高吞吐量场景，可以使用高频效频域多路复用（Spectrally efficient frequency domain multiplexing, SEFDM）<sup>[297]</sup>和重叠 X 域复用（Overlapped x domain multiplexing, OVXDM）<sup>[369]</sup>等系统来获得更高的 SE。ISAC 技术（后面将介绍）对波形设计提出了新的要求，期望用同一波形同时进行通信和感知<sup>[86]</sup>。

调制对通信系统的有效性和可靠性有很大的影响。目前，正交幅度调制（Quadrature amplitude modulation, QAM）调制被广泛应用，并被长期演进计划（Long-term evolution, LTE）和新空口（New radio, NR）标准采用。近年来，其他一些调制技术由于其在整形增益、PAPR 和鲁棒性方面的优势而受到关注，例如选择性 QAM、不规则 QAM、星座插值、多维调制和 IM<sup>[27], [298]</sup>。

### 5.2.2 新编码技术

高效的信道编码技术可以提高通信系统的容量、可靠性和服务质量。在香农理论的指导下，纠错码（Error-correcting codes, ECCs）实现了从代数编码到概率编码的飞跃，在提高通信系统的容量、可靠性和服务质量方面取得了巨大的成功<sup>[299]</sup>。通过在编码中引入随机性和稀疏性，并通过在译码中基于因子图传播软信息，先进纠错码可以接近甚至达到香农极限。其中最具代表性的 ECC 为 Turbo 码<sup>[370]</sup>、低密度奇偶校验（Low-density parity-check, LDPC）码<sup>[371]</sup>和 Polar 码<sup>[372]</sup>，它们分别是 4G 数据信道、5G 数据信道和 5G 控制信道的标准码。虽然它们的实际译码算法和实现不同<sup>[300]</sup>，但都是基于贝叶斯定理推导出来的，在 6G 超高速和超低功耗需求上相互竞争，这促使 6G 通信系统在复杂多变的场景下有了统一的译码框架。

作为线性分组码，这三个 ECCs 可以通过置信传播算法（Belief propagation, BP）译码，该译码器采用了著名的 Tanner 因子图上的和积算法<sup>[373]</sup>，但由于其高稀疏性，只对 LDPC 码有益。通过在因子图中添加辅助状态变量，和积算法成为 Turbo 码的后向递归运算算法（Bahl, Cocke, Jelinek, and Raviv, BCJR）<sup>[373], [374]</sup>，它在格状图上正向和反向传播消息。随着置信传播在连续的消息传递调度中推入，BP 解码器演化为经典的极化码连续消除（Successive cancellation, SC）解码器<sup>[375]</sup>，证明了在码长无限大时，Polar 码具有 Shannon 容量<sup>[372]</sup>。受限于 5G 控制信道有限码长下信道极化速率降低，SC 和 BP 译码均不能满足性能要求。码字搜索空间的增加是必要的，这就产生了 SC 列表/翻转<sup>[376], [377]</sup>和 BP 列表/翻转解码<sup>[378], [379]</sup>等算法。Turbo 码、LDPC 码和 Polar 码的编码方案虽然源于相同的译码规则，但可以进一步增强，如 Turbo 码的生成多项式<sup>[380]</sup>和 Polar 码的信息集<sup>[381]</sup>，从而实现统一的译码因子图和简化的译码算法，提高 6G 解码器的 EE。在消息传递中对指数运算的近似促进了这三种 ECC 解码器的电路实现，从而产生了 4G LTE Turbo 码的带窗 Max-log-BCJR 解码器<sup>[382]</sup>、5G NR LDPC 码的自适应最小和 BP 解码器<sup>[383]</sup>和 5G NR Polar 码的基于节点的 SC 解码器<sup>[384]</sup>。电路级 ECCs 的统一设计是 6G 的关键技术，如 Turbo/LDPC 解码器<sup>[385]</sup>和 LDPC/Polar 解码器<sup>[386]</sup>。在 6G 通信系统超低时延和超高可靠性的驱动下，ECCs 将采用较短的码长，削弱了上述三个 ECCs 的随机性、稀疏性和信道极化，从而降低了其实际解码算法的良好性能。一种替代方法是对经典代数编码采用接近最大似然解码方案，这也是任何线性分组码的统一方案，如分阶统计译码（Ordered statistics decoding, OSD）<sup>[387]</sup>和最近提出的容量实现猜测随机加性噪声解码（Guessing random additive noise decoding, GRAND）<sup>[388]</sup>。对于短长度场景，另一个有前途的解决方案是使用级联码，如 Arkans 新的分段极化调整卷积码（Polarization-adjusted convolutional, PAC）码<sup>[389]</sup>。通过充分利用 MIMO 系统中的大规模天线，一种空时二维编码方案将编码从时域连接到空域，在较短的解码延迟内提高可靠性和传输速率<sup>[390]</sup>。

### 5.2.3 现代随机接入策略

LTE 采用的 OFDMA 技术，5G NR 采用基于 OFDMA 优化的波形和多址接入，均为正交多址接入（Orthogonal multiple access, OMA）技术。6G 通信系统的连接密度将比 5G 增加数十倍。NOMA 是目前公认的最具发展前景的现代 6G 随机接入技术，可满足文献[27]、[30]、[32]、[52]、[54]等 6G 通信系统复杂多变场景下的低成本、高可靠、低延迟、海量连接和高吞吐量的需求。

在文献[391]中，NTT DOCOMO 首次引入了 NOMA 的概念，并证明了 NOMA 技术可以提高容量和小区边缘用户吞吐量性能。与传统的 OMA 技术相比，NOMA 的核心思想是鼓励多个终端在时间、频率和/或代码上重用相同的无线电资源。NOMA 在发射端主动引入干扰信息，并使用连续干扰抵消接收机解调。NOMA 有望提高频谱效率，增加系统容量，减少由

于调度和排队导致的系统延迟，以复杂性为代价减轻对准确 CSI 和反馈质量的依赖<sup>[301],[392]</sup>。

NOMA 方案可分为三类，包括能量域 NOMA，如多用户覆盖编码；码域 NOMA，如稀疏码多址；基于交织的 NOMA，如交织分割多址<sup>[302]</sup>。

在文献[393]中，综合总结了 NOMA 与大规模 MIMO、毫米波、认知与协作通信、VLC、物理层安全、能量收集和无线缓存等新兴无线技术的结合。结果表明，采用这些技术的 NOMA 可以进一步提高未来通信网络的可扩展性和绿色性等性能。在文献[394]中，利用人工噪声来保护大规模 MIMO-NOMA 网络的机密信息，从而最大化系统的总保密率和 EE。最近，一种新型的 NOMA 辅助 RIS 框架被提出用于部署和无源波束形成设计，并被证明可以进一步提高 EE<sup>[395]</sup>。在文献[396]中，将 NOMA 和环境后向散射技术结合起来，作为提高 SE 和 EE 的两种有前途的技术，并对该系统的可靠性和安全性进行了研究。

总体而言，NOMA 显示出了巨大的潜力，受到了学术界和工业界的广泛关注<sup>[301]</sup>。然而，由于一些技术原因和争论，NOMA 最终没有在 5G 中采用。在 NOMA 的实际应用之前，必须解决以下挑战：首先，应该探索高性能、低复杂度的多用户干扰抵消算法；其次应考虑到安全和信任的增强；另外还需要开发一个通用统一的 6G NOMA 框架<sup>[392]</sup>。

## 5.2.4 超大规模 MIMO

作为 5G 的关键技术之一，大规模 MIMO 最早由贝尔实验室的 Marzetta 于 2009 年提出<sup>[397]</sup>，因其能够显著提高 SE 而备受关注。当每个用户使用的天线数量大于 10 时，可认为是大规模 MIMO。在 6G 中，更大的天线阵列将被利用，使用数百甚至数千个天线，这被称为超大规模 MIMO。它能够在更多样化的频率范围内实现更高的 SE 和 EE、更广泛灵活的网络覆盖、更高的定位精度<sup>[303]</sup>，具有广阔的应用前景。首先，进一步扩大天线规模可以为空间波束提供非常高的空间分辨率和处理增益，从而提高网络的复用能力和干扰抑制能力，该系统对提高系统能耗、效率具有重要意义。此外，超大规模 MIMO 阵列具有三维调整波束的能力，因此可以提供非地面覆盖。更重要的是，超大规模 MIMO 阵列具有极高的空间分辨率，可以提高复杂无线通信环境下的定位精度，实现精确的三维定位。

综上所述，超大规模 MIMO 有以下的重要问题和发展趋势：1) 随着天线规模的进一步增大，近场效应和宽带效应将更加突出。由于采用了大型天线阵列，平面波前的假设不再成立，需要考虑球面波前<sup>[338]</sup>。空间宽带效应和频率宽带效应导致角度域和延迟域的信道稀疏性<sup>[398]</sup>。对于近场和宽带效应，在信道建模、信道估计、波束分配、码本设计和波束训练等领域进行了大量的研究<sup>[399]-[401]</sup>。2) 为了利用更丰富的频谱资源，超大规模 MIMO 有望利用更高的频段，如毫米波和太赫兹。对于目前正在进行研究的更高频段的超大规模 MIMO，主要集中在集成电路设计、信道特性、调制技术等方面<sup>[339],[402],[403]</sup>。3) 除传统的集中式有源天线阵列外，超大规模 MIMO 的实现方式有望更加灵活多样。通过使用 RIS（后面将介绍）而不是传统的有源天线<sup>[404]-[406]</sup>，可以显著提高网络覆盖、多用户容量和信号强度。4) 分布式超

大规模天线系统可以在广阔的地理区域内部署大量分布式天线，构建无蜂窝网络，有利于实现一致的用户体验，获得较高的 SE，降低系统的传输能耗<sup>[255], [304], [407]</sup>。5) 为了在超大规模 MIMO 系统中引入 AI 实现信道估计、信道测深、波束管理、用户检测等多个方面的智能化，需要解决实时性以及训练数据的问题<sup>[408], [409]</sup>。6) 超大规模 MIMO 也有望与空-天-地-海一体化网络相结合，它将为卫星通信<sup>[410]</sup>、天波通信<sup>[411]</sup>、水声通信<sup>[412]</sup>等一系列扩展应用场景带来巨大的性能提升。

### 5.2.5 带内全双工技术

与市面上的频分双工（Frequency-division duplex, FDD）和时分双工（Time-division duplex, TDD）不同，IBFD 技术可以使无线电在同一频段同时发射和接收，理论上可以使频谱效率提高一倍，扩大无线传输容量，实现更灵活高效的网络接入。IBFD 是未来无线通信<sup>[30], [32], [49]</sup>的关键技术之一。

IBFD 具有悠久的历史，自上世纪中叶以来一直用于连续波雷达系统的设计<sup>[413]</sup>。然而，由于技术上的限制，IBFD 一直没有进一步的实际应用，近几年作为解决频谱资源拥挤问题的潜在技术，重新获得了研究人员的关注。在文献<sup>[305]</sup>中，IBFD 中继作为一个典型应用进行了研究。在文献<sup>[414]</sup>中，提出了一种全双工技术来实现多个环境后向散射节点之间的同时通信。在文献<sup>[415]</sup>中，提出了一种使用单静态天线的 IBFD 架构，并进行了详细的测试来研究其性能。在文献<sup>[416]</sup>中，为了提高 IBFD 节点在干扰攻击下的吞吐量，提出了跳频技术和传输检测的操作模式。在文献<sup>[417]</sup>中，IBFD 首次应用于雷达通信系统，实现了联合通信和感知。

为了使 IBFD 的实际应用成为可能，主要的挑战是开发实现复杂度和成本适中的自干扰消除（Self-interference cancellation, SIC）技术。SIC 技术可分为电子 SIC 和光学 SIC。在<sup>[306]</sup>中，详细研究了应用于 sub-6 GHz 的电子 SIC 技术，并分析了组合不同方法产生的总体隔离性能。文献<sup>[418]</sup>设计了一种基于共享天线结构可用于 IBFD 收发机的 2.4 GHz 双极化微带贴片天线，该天线具有极高插入隔离性能。在文献<sup>[419]</sup>中，提出了一种非线性 IBFD 收发器的迭代估计和抵消技术。文献<sup>[420]</sup>开发了一种在数字域中使用并行 Hammerstein 自干涉抵消器的 IBFD 系统的理论分析技术。随着带宽的增加，实现自干扰抑制的难度将逐渐增加。在 6G 系统的 THz 和 OWC 频段应用 IBFD 技术面临更多挑战。OSIC 因其带宽大、精度高而逐渐引起人们的研究兴趣。作为“RF- In 和 RF- Out”光子集成电路的首次测试，文献<sup>[421]</sup>对 SIC 集成微波光子电路进行了完整的射频表征。在文献<sup>[422]</sup>中，提出了一种基于光子学辅助变频的 SIC 方法，并通过实验验证了 IBFD 通信的可行性。

## 5.3 新物理维度

为了促进大型物联网的蓬勃发展，6G 通信将利用现有频谱资源以达到更高的数据传输

速率。除了发展例如多天线、调制、编码和双工等传统空口技术，OAM、RIS 和全息无线电等新物理维度和传输载体可进一步提升系统频谱效率。

### 5.3.1 轨道角动量

OAM 是电磁波的固有物理量，是除频率，相位和空间外的新维度，可以为无线通信提供新的调制维度。携带 OAM 的电磁波也被称为涡旋波，其相位面呈涡旋状而不是传统的平面波波前。特定天线用于生成携带正交 OAM 模式值的涡旋波，每一模式值均可独立传输不同信息。因此，携带多个 OAM 模式值的电磁波可实现单链路多路信号同时传输。利用 OAM 模式值的正交性，通信系统有望在不增加频谱资源的情况下，实现高频谱效率和高信道容量[27], [32], [51], [52]。

自从 Allen 教授等在 1992 年发现涡旋光波携带 OAM<sup>[423]</sup>，无线电和声学频段关于 OAM 的研究也陆续展开。陈睿等人总结了光、无线电和声学 OAM 的产生和检测<sup>[307]</sup>。近期，OAM 技术因其在毫米波、THz 频段上探索新维度的能力受到了广泛关注<sup>[308]</sup>。

OAM 技术因其具有提供高数据传输服务的可能性，在光纤，无线光，无线电和声波通信中均有巨大潜力<sup>[307], [424]</sup>。此外，OAM 和 MIMO 通信的结合有望实现更高的容量和 SE<sup>[27]</sup>，该结合技术可分为两大应用方向<sup>[425]</sup>。一是发射端采用 OAM 天线，接收端采用传统天线，反之亦然。OAM 模式值将用于减小空间相关性以提升容量和 SE。理论和数值结果已证明基于 OAM 的 MIMO 系统等价为天线间隔更大的传统 MIMO 系统，使其有望带来更高的 SE<sup>[426]</sup>。在文献[427]中，提出采用两个 OAM 模式值的 MIMO 系统，吞吐量与传统 MIMO 相比可提升 30.50%。该种基于 OAM 的 MIMO 系统在多径环境下的性能在文献[428]中展开讨论，在小角度扩展的环境下，基于 OAM 的 MIMO 系统信道容量优于传统 MIMO 系统。另一种 OAM 的应用方向为收发端均采用 OAM 天线。最常见的 OAM 天线配置是均匀环形阵列（uniform circular array, UCA）。尽管基于 UCA 的 OAM 可以看做传统 MIMO 的一个子集<sup>[429]</sup>，其 SE 仍遵循传统 MIMO 的上界，但与传统 MIMO 相比，其在视距（line-of-sight, LOS）环境下利用 OAM 模式值间的正交性，系统可获得更低的复杂度。Y. Yagi 等学者已证明利用双极化 UCA 的 OAM 复用 MIMO 系统可实现超过 200 Gbps 的传输速率<sup>[430]</sup>。此外，OAM 复用可以和其他复用技术结合。T. Hu 等人提出了时间切换的 OFDM-OAM 复用 MIMO 系统以获得高速率和低计算复杂度<sup>[431]</sup>，同时对该应用在多径和非对齐场景下的性能进行了研究。文献[432]基于相位补偿提出了一种混合正交复用方案，在稀疏多径的环境下，OAM 和 OFDM 复用结合可有效提升容量。A. A. Amin 等人将 OAM-MIMO 复用系统和 NOMA 结合，证明了 OAM 在多用户下行链路场景下增加信道容量的可能性<sup>[433]</sup>。OAM 也可用于雷达技术，基于 OAM 的感知技术也被引入微波感知领域<sup>[309]</sup>。

OAM 技术实际应用前仍存在许多挑战亟需解决。波束收敛和非对齐将严重降低 OAM 电磁波的传输距离。此外，反射和折射将破坏 OAM 波的正交性。因此，OAM 在 NLOS 场景下

的应用仍为一开放问题。作为系统分析基础的信道测量和建模在 OAM 应用方面仍较为欠缺。在未来 OAM 的商用中，组件方案、天线设计和信号处理等技术难题仍需解决。

### 5.3.2 智能反射面

RIS 是由大量可编程超材料组成的二维表面，每一个单元均可以动态、智能地操纵输入信号，以形成幅度、相位、极化和频率可控的电磁场。因此，有望形成可控幅度、相位、极化和频率的电磁场以提升通信性能。与传统结构的发射机相比，RIS 具有低成本、低能耗、易于部署的优势，可显著提高网络传输速率，增强信号覆盖，提高频率、能源和成本效率 [32], [43], [310], [311]。

RIS 是极具应用前景的 6G 潜在关键技术之一，在构建智能无线电环境 [312], [434]、改善大规模连接、增强覆盖、避免覆盖漏洞、替代中继 [313]、提高小区边缘传输速率、实现绿色通信、辅助电磁环境感知或高精度定位 [32]、提升通信可靠性 [45]、改善无线生理传感器网络 [46] 和实现超表面全息技术 [27], [435] 方面有较强的优势。RIS 应用的细节在 [314] 和 [315] 中进行了更为详细的阐述。

近期，许多 RIS 相关研究陆续展开。2011 年，广义斯涅尔定律的提出丰富了电磁超表面的相关理论 [436]。2014 年崔铁军院士课题组提出了编码超材料、数字超材料和可编程超材料的概念 [437]。在 RIS 信道方向也进行了相关研究，成为理论分析和实际应用的基础。文献 [438] 分别提出了远场、近场和近场广播情形下的自由空间路径损耗模型，相关的测量实验进一步证明了所提模型的有效性。在毫米波频段，文献 [439] 提出了一个广泛应用的物理 RIS 信道模型和对应的开源 RIS 信道仿真器 SimRIS，同时进行了多次数值实验和测试以探索 RIS 原型系统在提高系统效率，增加吞吐量和增强覆盖范围等方面的能力。文献 [440] 在多用户多输入单输出 (Multiple-input single-output, MISO) 下行链路场景下提出基于 RIS 的资源分配方法，与传统中继相比可获得高达 300% 的高 EE。E. Basar 等人在大规模 MIMO 无线网络中提出 RIS 辅助的 IM 概念，有望在低信噪比 (Signal to noise ratio, SNR) 条件下获得高频谱效率 [441]。文献 [142] 研究了 RIS 辅助的 MIMO 上传链路通信系统中 EE 和 SE 的折中问题。文献 [442] 提出了双极化 RIS 以实现面向未来网络的低成本超大 MIMO 传输架构 [442]。在下行 NOMA 系统中，RIS 的应用使得速率性能显著提升 [443]。在文献 [444] 中，DRL 被应用于联合优化基站端的发射波束赋形矩阵和 RIS 处的相移矩阵。在毫米波蜂窝网络中，M. Nemati 等学者中证明了利用 RIS 可有效增强覆盖 [445]。在 [446] 中，系统级的仿真证明了 RIS 在室内和室外均可提升覆盖范围和遍历速率。J. Yuan 等学者在下行链路 MISO CR 系统中引入多个 RIS，证明了其可增加二级用户的可达速率 [447]。

RIS 在未来应用方面仍存在许多挑战，例如硬件能力的限制，基带算法，无线网络架构和网络方案。此外，高频段下 RIS 的成本和功耗以及 RIS 系统的部署规模和方法仍需进一步的探究。

### 5.3.3 全息无线电

全息无线电利用电磁波的全息干涉实现电磁空间的动态重构和实时精准控制。该技术通常利用空间连续的微波孔径，是一种实现空间复用的新方案。全息无线电能够满足超高 SE、超高流量密度、超大容量的需求，有助于成像收敛、感知和无线通信，以支持电磁空间的智能化<sup>[32], [47]</sup>。全息无线电也被认为是全息 MIMO，可以理解为有限空间下的多天线系统最终形式<sup>[27], [448]</sup>。

全息无线电可以充分利用干扰，将其视为增强能效的有利资源<sup>[42]</sup>。除此以外，全息无线电利用全息干扰成像获得无线电传输信号的频谱干涉图，进而减小信道估计<sup>[316]</sup> 开销。在不久的将来，全息无线电可以在智能工厂、高精度定位、精准无线供电等场景中充分发挥其潜力<sup>[32]</sup>。

如何实现连续孔径天线阵列是全息无线电最首要的技术难点之一。目前，有两种方法可以近似实现连续微波孔径。第一种方法是紧密布置亚波长单元以实现连续或准连续孔径，例如可重构全息表面（Reconfigurable holographic surface, RHS）<sup>[449], [450]</sup>。超宽带紧密耦合天线阵列是另一种更具前景的方案<sup>[27]</sup>。该技术利用高能单行载流子（Uni-traveling-carrier, UTC）光电探测器（Photodetector, PD）与天线振子耦合。UTC-PD 可构成光电耦合阵列天线，具有低成本、低功耗的优势<sup>[42], [451]</sup>。

如何发展全息无线电通信理论，建立可靠的信道模型和实现全息无线电系统带来的低时延高可靠性的数据处理能力仍是未决的难题。

## 5.4 新能力

在这部分中，将介绍可能加强各级 6G 系统的技术。AI、ISAC 和区块链可以分别为 6G 系统提供智能、感知和安全方面的新能力。语义通信将大大扩展通信系统的能力，使一切的智能连接成为现实。

### 5.4.1 人工智能

过去十年，AI 发展迅速，在众多行业中显示出其压倒性优势。ML 和 DL 是 AI 的重要子集，能够随着时间的推移学习和发展。AI 技术具有较高的鲁棒性、自适应学习能力以及较强的理解和推理能力，在许多方面都具有巨大的应用潜力，特别是在有大量数据可供训练的场景中。与此同时，通信系统正在高速发展，实现更大的吞吐量、更低的延迟、更大数量的连接以及更智能的服务。新的需求和技术的引入，导致通信网络的数据量和复杂性增加，对传统通信算法造成了严重的限制。AI 预计将应用于 6G 网络的所有层，将简化网络管理和优化，使通信系统更加高效和智能<sup>[32], [52], [317], [452]</sup>。文献[60]表达了类似的 AI 前景，作者提出了



一种面向普适网络智能的四级 AI 架构。

AI 将给传统的空中接口设计带来颠覆性的变化。在物理层, AI 被应用于无线信道研究, 能够基于大量的传播环境参数<sup>[319], [453], [454]</sup>对复杂信道进行建模和预测。由于传统信道估计技术计算复杂度高, 目前已尝试利用 AI 进行信道估计和信号检测<sup>[455], [456]</sup>。AI 还可以应用于 E2E 收发器的设计<sup>[457], [458]</sup>、信道编码解码技术<sup>[459], [460]</sup>、调制和波形设计<sup>[461], [462]</sup>。AI 具有高效提取和表达高维特征空间的能力。因此, 其在天线尺寸显著增长的 MIMO 技术领域的应用也受到了很多关注<sup>[463], [464]</sup>。在 MAC 层, AI 被广泛应用于主动用户检测<sup>[465], [466]</sup>、接入控制<sup>[467]</sup>、无线链路调度<sup>[468]</sup>等方面。此外, 由于深度多智能体强化学习<sup>[469]</sup>的最新发展, MAC 协议有望被自动设计。文献<sup>[470]</sup>引入了一种基于深度神经网络的传输调度方案。此外, AI 还可以在提高无线定位精度方面发挥作用<sup>[471]</sup>。

在网络的上层, 人工智能预计将得到更广泛的应用, 并给网络架构带来巨大变化, 实现普适网络智能化<sup>[38], [60], [472]</sup>。首先, 人工智能可以实现有效的资源分配和干扰管理方案。在文献<sup>[473]</sup>和<sup>[474]</sup>中, 利用深度神经网络来解决干扰管理问题, 在需要较少的计算资源的同时, 获得更好的功率控制结果。文献<sup>[367]</sup>提出了基于区块链和 AI 的动态资源共享架构来实现高效的模式识别和决策。此外, 随着数据流量的增加, 网络流量控制成为一个重要的问题。可以利用 AI 对网络流量进行预测, 并采用相应的资源控制算法来减少拥塞。在文献<sup>[475]</sup>中, 讨论了 5G 网络流量管理的 ML 算法。在文献<sup>[320]</sup>中, 总结了应用于传输层拥塞控制的主要 AI 算法。此外, AI 还可以用于网络需求预测和缓存, 有助于降低延迟和运营成本<sup>[476]</sup>。面对应用数据的爆炸式增长, 基于人工智能的分布式计算技术可以进一步释放边缘节点<sup>[477]</sup>的计算和数据资源的潜力。除了应用人工智能解决网络每一层的特定问题外, 文献<sup>[478]</sup>还提出了一种基于 DL 和知识图谱的智能内生网络架构。该网络可以根据新的服务需求自动改变, 这有望进一步解锁人工智能的可扩展性、迭代增强和模型泛化应用的能力。此外, 在文献<sup>[479]</sup>中还引入了一种基于两层约束强化学习的动态 RAN 切片方案。

在将人工智能应用于空中接口设计的过程中, 需要解决一些问题。人工智能不能完全取代传统的方法, 需要确定学习方法<sup>[318]</sup>的应用领域。此外, 未来的研究还需要探索针对特定问题<sup>[480]</sup>的人工智能学习技术。网络人工智能面临的挑战将稍后讨论。

## 5.4.2 通感一体化

作为 6G 通信系统六大愿景之一的“全应用”提出了通信网络与感知网络融合的必要性和必要性。广义上的感知网络是指能够感知所有业务、网络用户、终端和环境对象的属性和状态的系统<sup>[321]</sup>。ISAC 是实现 6G 集成网络的重要支撑技术, 感知和通信系统的集成和相互辅助, 可以有效利用拥挤的无线资源和/或硬件资源, 并提高硬件、频谱、时间和能量的效率<sup>[85]</sup>。

在过去的几十年里, 通信和感知技术是并行发展的, 而且这两个系统是相对独立的。然而, 随着通信技术的发展, 感知系统和通信的结合更加紧密, 它们都倾向于使用一致的高频

和大孔径天线，并有望使用相似的信号和数据处理方法<sup>[322]</sup>。

ISAC 概念的出现可以追溯到 20 世纪 60 年代。在文献[481]中，R.M. Mealey 等人使用编码脉冲将地面雷达的信息传输到航天器上。然而，之后几乎没有进一步的发展。近年来，随着相关技术的发展，ISAC 受到了广泛关注。国内外学者已经开展了大量相关技术的理论研究和系统实现。C. Sturm 等人讨论了 ISAC 的波形设计和信号处理问题，并利用 OFDM 波形实现了第一个 ISAC 系统<sup>[482]</sup>。A. R. Chiriyath 等人首次对 ISAC 进行了信息论分析<sup>[483]</sup>。车联网场景下的 ISAC 在文献[484]得以实现。F. Liu 等对 ISAC 设计的应用、研究现状和未来发展方向进行了综述<sup>[86]</sup>。J. A. Zhang 等人以信号处理为重点，对相关 ISAC 技术进行了综述<sup>[323]</sup>。Y. Cui 等人综述了 ISAC 的发展概况，列举了物联网架构下的 ISAC 用例，并介绍了未来发展的几个挑战和机遇<sup>[85]</sup>。在文献[324]中，对自动驾驶汽车的联合雷达-通信策略进行了调研。在[325]中，提出了定位与通信一体化的研究综述。此外，IEEE 802.11bf 成立于 2020 年，专注于无线局域网（Wireless local area network, WLAN）的感知。此外，3GPP SAI 于 2022 年 3 月启动了关于 ISAC 的研究项目。

该技术研究挑战包括构建高精度 ISAC 测量设备、设计合理的测量场景、选择评估感知信道与通信信道相关性的高效传输频带以及建立精确的 ISAC 信道模型等。在此基础上，需要考虑如何在避免干扰和碰撞的基础上，在硬件架构、系统设计、波形设计、抗干扰信号处理等方面兼顾通信和感知需求<sup>[321]</sup>。

### 5.4.3 区块链

区块链技术于 2008 年首次被提出用于加密货币<sup>[485]</sup>。区块链使用由散列指针连接的分布式数据库，具有分散化、透明度、匿名性、不变性、可追溯性和弹性的特点<sup>[326]</sup>。由于 6G 网络结构更扁平化，数据转换更频繁，传统的集中式安全认证和访问控制机制将不再是完全适用的<sup>[225]</sup>。区块链为分布式和异构网络设备和基础设施之间的信任和安全相关问题提供了一个有希望的解决方案，并被认为是 6G 通信系统的关键技术之一<sup>[32], [43], [52]</sup>。在 2018 年美洲移动世界大会（MWCA）上，FCO 概述了在未来 6G 网络中部署区块链的愿景。在文献[493]中，提出了区块链无线接入网（Blockchain-RAN, B-RAN）架构用于去中心化的安全无线接入。

一系列关于区块链在通信领域应用的研究正在进行中。由于其抗篡改、去中心化、细粒度可审计、内嵌非对称加密等特性，区块链有望同时提供数据安全和隐私保护。在文献[494]中，提出了一种基于区块链的分布式域名系统来防御 DDoS 攻击，在文献[487]中，区块链被用于无线网络中用户身份和机密数据的隐私保护。此外，区块链可以在广泛的分离网络实体中促进更高效的资源共享。在文献[327]中，提出了基于区块链的频谱管理来提供安全和高效的分散频谱共享。在文献[489]中，区块链首次被用于网络切片，以促进切片租赁。在文献[490]中，提出了区块链授权的 MEC，以保证计算和存储容量共享的安全性和可追溯

性。在文献[328]中研究了区块链解决方案，以平衡分散式数据管理中的透明度、效率和隐私要求。此外，区块链在大规模物联网中发挥着重要作用，可确保数据安全和数据隐私、大规模数据的可追溯性，以及跨设备的互操作性。在文献[329]中，区块链和物联网被结合起来，以安全高效的方式存储、访问和管理来自患者的实时认知数据。在文献[491]中，针对IoT系统提出了一种基于区块链的分层可扩展信任管理协议，该协议被证明在可扩展性、移动性支持、通信和计算成本方面优于现有的解决方案。在文献[330]中，对采用区块链支持的车联网（Internet of vehicle, IoV）信息交换进行了全面的综述。文献[492]提出了一种基于区块链的协作群智感知（Collaborative crowdsensing, BCC）方案，提升了自动驾驶车辆群智感知的安全性和效率。在智能电网领域，区块链可应用于促进隐私保护和高效的数据聚合<sup>[331]</sup>。最后一个需要关注的应用程序是联邦式学习，它是由区块链提供内在支持。在文献[282]中，提出了一个区块链授权的联邦学习框架，以开放和兼容的方式共享智能，从而提高了数字孪生网络的效率和安全性。

虽然区块链有望在各方面促进6G网络的发展，但其去中心化的特性会造成延迟相对较长、存储效率低、吞吐量性能有限等问题。因此，它可能只适用于某些应用场景。此外，区块链目前的底层技术平台呈现出分散的状态，需要建立统一的标准和规范，以促进各系统的集成。

#### 5.4.4 语义通信

语义通信是一种从信息源中提取语义信息，编码并在噪声信道中进行传输的通信方法。语义通信不需要在位级别上进行无错误传输，而是主要依赖于建立一个在大量人类用户和机器中普遍存在和可理解的语义知识库。它有望突破经典通信系统的传输瓶颈，将通信网络从基于数据协议和格式的传统架构中解放出来。语义通信有望进一步提高通信的效率和可靠性，提高以人为本的服务质量，真正实现一切智能体的无缝智能连接<sup>[265]</sup>、<sup>[493]</sup>。

1948年，Shannon提出了经典的信息论<sup>[494]</sup>。后来，Weaver指出，语义问题涉及到传递的符号如何精确地表达期望的意义，激发了对语义信息<sup>[495]</sup>的思考和研究。语义信息论的概念在文献[496]中提出，并在文献[497]-[499]中进一步完善。文献[500]指出，是对内容的理解和逻辑推理的能力是语义信息论的关键能力。在文献[501]中，证明了语义信息的表示是唯一的。在文献[493]中，分析了经典的点对点语义通信的局限性，提出了一种基于联邦边缘智能的资源高效语义感知网络体系结构，用以降低资源消耗、提高通信效率。在文献[502]中，提出了一种新的语义表示框架来建立一种智能、高效的语义通信网络架构，该架构的带宽要求更低、冗余性更少、意图识别更准确。

最近，语义通信被用于端到端通信系统，以解决传统块通信系统的瓶颈问题。几项相关研究考虑了不同类型的信息源，侧重于图像和文本传输<sup>[319]</sup>、<sup>[503]</sup>-<sup>[505]</sup>。语义通信也可以应用于语音信号处理中，在自动语音识别中将语音信号转换为文本信息，但并不关心语音信号的特

征，如语音速率和语调<sup>[506]</sup>。

目前，语义通信技术仍在快速发展中，许多基本概念需要开发和改进<sup>[265], [493]</sup>。首先，语义基本要素的准确性决定了其在实际应用中的可靠性是语义通信中最基本的问题。其次，如何设计一种有效的语义容错和纠错机制尚不明确。并且，目前还缺乏一种可以在资源有限的设备上实现的快速语义信息检测和处理的简单、通用的解决方案。不同实体之间的语义信息模型难以共享，加剧了在通信系统中采用语义通信的挑战。此外，语义通信还对网络安全提出了全新的要求，需要建立完善的审查机制，防止语义知识图谱被恶意篡改，建立安全可靠的存储和召回机制，防止用户隐私信息泄漏。

### 5.4.5 能源中性设计

无源（能量中性）设备依赖从环境中收集的电力来支持其运行，最重要的一类是从特定的功率发射机或环境信号中收集 RF 功率的设备。通常，这些设备包括一个由入射 RF 场充电的电容器，并通过后向散射进行通信。后向散射时，器件不需要 RF 链路，而是通过调节天线的负载阻抗来改变后向散射场；随后，网络节点检测该变化从而实现数据传输<sup>[334], [507]-[512]</sup>。从电子学的观点来看，负载调制后向散射天线类似于 RIS 中的原子（见 5.3.2 节）。

能源中性设备将使一系列新应用成为可能，从大规模传感器遥测到工厂、医院和智慧城市中的商品和人员跟踪。特别地，建造和部署大量没有电池的电子设备十分具有吸引力，因为不需要电池充电或更换，并且可以避免使用传统电池所需的有毒材料。

后向散射通信的主要挑战之一是链路预算。由于从网络节点到设备的路径增益为 $\beta$ ，从网络节点到设备的总路径增益为 $\beta^2$ 。为了克服高路径损耗，要么必须使用定向天线（在网络节点和/或设备上），要么必须依赖网络侧的天线阵列<sup>[333], [513]-[515]</sup>，大规模 MIMO 是 5G 和 6G 的核心物理层技术，可以通过增加天线数量提高阵列增益。当在基于信道互异性的模式下（如 TDD）运行时，这种缩放也适用<sup>[516]</sup>。利用这一特点，大规模的 MIMO 技术被视为与后向散射设备通信结合的关键技术并且目前正在开发中，例如欧洲 H2020-REINDEER 项目已开展研究<sup>[12]</sup>。此外，成本问题也是一大挑战，在更多的设备被大规模部署的前提下，如果单个设备成本过高，总体成本则将难以承受。

## 第六章 6G 实验平台

在第四至第五章中，我们已经介绍了许多潜在的网络架构和技术。目前，标准化组织已经开展了一系列前瞻性的工作。我们调研了 3GPP (R18-R19)、IEEE 标准、ETSI 技术小组以及 ITU-T 和 ITU-R 研究小组的研究及工作项目<sup>[517]-[521]</sup>。表 9 和表 10 分别总结了 6G 网络架构和潜在技术的标准化工作细节，并提供了标准化过程的概述。然而，目前尚有几种技术未被标准化组织研究，也未被总结入表中。为了加快技术研发及后续标准化工作，6G 实验平台开发是不可或缺的任务之一。

为了调查用于信道特性探索、关键技术验证和通信系统整体评估的实验平台研发现状，本节对不同用途的 6G 实验平台做出了总结。我们将重点介绍 6G 信道测量、6G 关键技术及 6G 系统综合验证三类实验平台。

表 9 6G 网络架构标准化<sup>[517]-[521]</sup>

网络结构		3GPP (R18-R19)		IEEE	ETSI			ITU	
		研究项目	工作项目	标准	开源小组	技术评标委员会	行业规范小组	ITU-T	ITU-R
5G 增强	NFV	√	√	√			√	√	
	SDN			√	√			√	
	SBA	√	√					√	
	网络切片	√	√					√	
3D 多网融合	卫星	√	√			√		√	√
	海事							√	
	UAV	√	√	√				√	
	(IoT/NR) NTN	√	√						
安全性可靠性	区块链			√				√	
	量子通信/量子密钥分发			√			√	√	
	网络安全增强	√	√	√		√		√	
通感算一体化	多层泛在计算网络							√	
	云计算			√				√	
	边缘计算	√	√	√			√	√	
	雾计算			√					
内生智能	网络智能增强	√	√				√	√	

表 10 6G 潜在技术标准化<sup>[517]-[521]</sup>

技术	3GPP (R18-R19)		IEEE	ETSI			ITU	
	研究项目	工作项目	标准	开源小组	技术评标委员会	行业规范组	ITU-T	ITU-R
THz			√			√		
OWCs			√					√ (VLC)
频谱管理			√					
超大规模 MIMO	√ (上下链路 NR MIMO 演进)	√						
RIS						√		
AI	√	√	√			√	√	
ISAC	√	√						
区块链			√				√	
语义通信							√	
能源中性设备	√ (NR 网络节能研究)	√						

## 6.1 6G 信道实验平台

信道特性表征、测量和建模是通信系统设计、理论分析、性能评估、优化和部署的基础。任何新的频段、场景和通信技术都会带来新的信道特性。因此，随着通信系统的发展和演变，信道研究在各级通信系统中都发挥着不可或缺的作用。一般情况下，无线信号衰落包括大尺度衰落和小尺度衰落。大尺度衰落包括路径损耗和阴影衰落，而小尺度衰落是指多径衰落。大尺度衰落建模在无线网络中起着关键作用，包括链路预算计算、网络规划、优化和资源分配，而小尺度衰落模型主要用于无线传输，如信道估计、调制和编码器设计。其他的应用，例如信道容量分析和室内外定位，则需要同时考虑大尺度和小尺度衰落。

随着新的应用场景和技术出现，6G 信道将呈现新的特点。因此，为未来 6G 研究提供合适的信道实验平台至关重要。现有的信道实验平台可分为软件信道仿真器和硬件信道测深器两种，其最新发展情况介绍如下。

### 6.1.1 6G 普适信道仿真器

信道仿真器利用不同的信道模型来模拟真实信道环境下的传播特性。6G 信道建模最关键的问题是需要充分考虑 6G 全频谱和全场景信道的特性。文献[522]中提出了一种普适的 6G

无线信道建模理论。该理论使用统一的信道建模框架和方法，采用统一的信道冲激响应（Channel impulse response, CIR）表达式，综合考虑了 6G 信道在所有频谱、所有场景下的统计特性，并在此基础上构建了适用于 6G 全频谱、全场景的 6G 普适信道模型（6G pervasive channel model, 6GPCM），以准确反映不同信道的特性。



图 10 普适无线信道建模理论<sup>[522]</sup>

图 10 阐述了 6G 普适无线信道建模理论，该理论可用于指导 6G 标准化信道模型的构建。在信道建模方法方面，可以采用基于几何的随机信道模型（Geometry-based stochastic channel model, GB SM）或射线追踪（Ray tracing, RT）等非预测模型，也可以采用基于 AI/ML 的预测模型。5G 及之前的 3GPP TR 38.901、IMT-2020 等标准化信道模型多采用 GB SM 建模方法，预计标准化的 6G 信道模型也将主要采用 GB SM 建模方法。而 RT 和 AI/ML 建模方法则可用于个别频段或场景以作补充。

在 6G 普适信道建模理论的指导下，文献[522]中首次提出了一种基于 GB SM 框架的 6GPCM。其旨在构建 6G 普适 GB SM 的标杆，并有望成为探索 6G 标准化信道模型的先行者。该模型适用于 6G 通信系统中的 sub-6 GHz、毫米波、THz、IR 以及 VLC 等所有频段，LEO 卫星、UAV 及海上通信等全球覆盖场景，超大规模 MIMO、IIoT 以及 RIS 等全应用场景。通过拟合现有标准化信道模型文件的信道测量数据，可以构建全频谱全场景的参数数据库。考虑到信道测量的成本和局限性，还可以选择基于 RT 和 AI/ML 的方法以采集不同频谱及场景的信道参数，从而完善信道模型参数数据库。通过调整信道模型参数，可以简化 6GPCM 以对特定频谱及场景的信道进行模拟。通过分析 6GPCM，可以深入研究信道模型参数、信道特性和通信系统性能之间的复杂映射关系。6GPCM 对于 6G 信道模型标准化，以及 6G 空天地海网络一体化理论、技术与系统集成研究具有极其重要的意义。

### 6.1.2 6G 信道探测器

信道探测器作为一种主动识别信道的仪器，对于建立 6G 全频谱、全覆盖、全应用的标

准化信道模型具有重要意义。信道探测器通常由 Tx、Rx 和数据采集单元组成，是利用未知传播环境特性的信道测量平台<sup>[523]</sup>。为了评估信道探测器的性能，定义了如带宽、时延范围、信道快拍（Channel snapshot, CS）、重复率和动态范围等关键属性<sup>[524]</sup>。首先，带宽和时延分辨率互为倒数。带宽越大就意味着时延分辨率越高，但通常设备的成本或复杂性也会随之变高。第二，时延范围是指信道探测器在动态范围内可探测到的最大传播距离。一般来说，室内场景所需的时延范围相对较小，大约几百纳秒，而室外场景则需要数微秒。第三，CS 重复率是移动场景下信道测量的重要指标。根据奈奎斯特采样定理，当采样率两倍高于信号带宽时，信号即可被完美恢复。移动信道的带宽等于最大多普勒频率，因此 CS 重复频率应大于最大多普勒频率的两倍。最后，信道探测器的动态范围等于最强可识别 MPC 功率和噪底之间的差值<sup>[525]</sup>。通过对多个 CS 进行平均和增加探测波形长度，可以提高动态测量范围。

表 11 信道探测器总结

种类	参考文献	组织	频率和带宽	场景/应用	天线
全频段	[526]	北京交通大学	3.6 GHz (30 MHz)	室外移动场景	Tx&Rx: 单天线
	[527]	SEU	0.7 GHz, 2.3 GHz, 3.7 GHz (100 MHz)	城市宏小区	Tx: 单天线, Rx: 32 双极化平面天线(0.7 GHz), 8×4 双极化平面天线 (2.3 GHz, 3.7 GHz)
	[528]		5.5 GHz (320 MHz)	室内办公室	Tx: 4×4 双极化平面天线阵列, Rx: 4×8 双极化圆柱天线阵列
	[529]	北京邮电大学	3.5 GHz (100 MHz)	室内（移动、静止）	Tx: 32 天线, Rx: 56 天线
	[530]	清华大学	28 GHz (1 GHz)	室内办公室	虚拟天线阵列
	[531]	SEU	40 GHz (500 MHz)	室内和室外场景	虚拟天线阵列
	[532]	南加州大学	140-220 GHz	室内办公室	Tx&Rx: 喇叭天线
	[533]	北京邮电大学	220-330 GHz	室内场景	Tx&Rx: 喇叭天线
	[534]	奥兹耶金大学	850 nm (250 MHz)	室内（移动、静止）	Rx: 4 个 LED 灯, Rx: 光敏二极管
	[535]	国立台湾大学	-	室外 V2V	Tx: LED 前照灯, Rx: 光敏二极管
全覆	[536]	加的斯大学	5.8 GHz	海港	Tx&Rx: 全向单天线



盖	[537]	超级无线电中心	2.075 GHz (20 MHz)	海上	Tx&Rx: 垂直极化单天线
	[538]	南加州大学	C-频段 5-5.1 GHz (50 MHz); L-频段 960-977 MHz (5 MHz)	空对地	Tx&Rx: 双极子天线
	[539]	北卡罗来纳州立大学	3.1-4.8 GHz	空对地, 开阔空间	Tx&Rx: 单极子天线
	[540]	移动式 and 便携式无线电研究小组	3 GHz (900 MHz)	室柱矿井	Tx&Rx: 单天线
	[541]	魁北克大学	60 GHz (7 GHz)	隧道矿井	Tx&Rx: 多天线
全应用	[542]	SEU	5.3 GHz (160 MHz)	城市宏蜂窝/超大规模 MIMO	Tx: 128 天线 ULA, Rx: 8 全向天线阵列
	[543]	北京交通大学	1.47 GHz (91 MHz)	室外体育场/超大规模 MIMO	Tx: 128 天线 ULA/UCA, Rx: 双天线
	[544]	SEU	5.4 GHz (160 MHz)	城市宏蜂窝/RIS	Tx: 32 天线 UPA, Rx: 64 天线圆柱阵列
	[545]	法国格勒诺布尔-阿尔卑斯大学	28 GHz (4 GHz)	室内实验室和办公室/RIS	Tx: 虚拟天线阵列, Rx: 全向单天线
	[546]	SEU	5.5 GHz (320 MHz)	机械和汽车车间	Tx: 32 平面天线阵列, Rx: 64 天线圆柱天线阵列
	[547]	华为	140 GHz	暗室/ISAC	Tx: 喇叭天线, Rx: 虚拟天线阵列
	[548]	巴克豪森研究所	26 GHz, 71-76 GHz	室内/ISAC	Tx: 16 天线 ULA

6G 信道探测器可用于研究全频段、全覆盖和全应用场景的信道特性。表 11 展示了相关信道测量实验的具体配置，其详细说明如下。

根据信道测量频率，信道测深器可分为 sub-6 GHz、毫米波、太赫兹和可见光频段信道探测器。在文献[526]中，作者使用时域信道探测器在户外移动场景中开展了 3.5 GHz 信道测量，测量系统收发端均使用了全向单天线。在文献[527]中，作者采用两组时域信道探测器在城市宏小区场景开展了 0.7 GHz、2.3 GHz 和 3.7 GHz 的跨频段信道测量，每次同时测量两

个频段。在接收端，4×4 双极化平面天线阵列被用于 0.7 GHz 的信道测量，8×4 双极化平面天线阵列则被用于 2.3 GHz 和 3.7 GHz 的信道测量。发送端所有频段的信道测量均使用了全向单天线。在文献[528]中，作者使用时域信道探测器开展了室内办公室场景的 SISO 和 MIMO 信道测量。两个全向天线被分别用作 SISO 信道测量的发射和接收天线。在 MIMO 信道测量中，发送端采用了 4×4 双极化平面天线阵列，接收端则采用了 4×8 双极化圆柱形天线阵列。在文献[529]中，作者通过时分多路复用在 3.5 GHz 开展了 32×56 MIMO 信道测量。测量系统收发端都配置了高速电子开关。为了研究毫米波频段的路径损耗，文献[530]搭建了一个基于矢量网络分析仪(Vector network analyzer, VNA)的 28 GHz 信道探测器。该信道探测器收发端均使用了天线转台，以获得信道的空间特征。此外，在文献[531]中提出了一种基于 VNA 的信道探测器。该信道探测器的测量频率和带宽分别可达 40 GHz 和 500 MHz。文献[532]构建了一个基于 VNA 和频率扩展器的 140-220 GHz 太赫兹信道探测器来进行视距场景 (Line-of-sight, LOS) 信道测量实验，通过分析测量的时延功率谱，发现 LoS 信道中多径分量不可忽略。文献[533]构建了一个带宽为 2 GHz 的 220-330 GHz 太赫兹信道探测器，以研究室内静态场景中路径损耗的频率依赖性。该信道探测器的收发端都配备了高增益的定向喇叭天线。在文献[534]中，作者利用质心波长为 850 nm 的红外 LED 开展了光频段室内信道测量。这两个收发器都有宽视场和波束宽度，可以支持移动场景信道测量。通过使用时域信道探测器，文献[535]开展了 VL 波段的室外 V2V 信道测量。测量系统发送端使用商用车辆前照灯，并且在接收端采用了可安装在汽车上的光敏二极管。

此外，根据信道测量场景，信道探测器主要可分为 UAV、海上和地下矿井信道探测器。为了研究海上通信场景中的无线传播信道，需要相应的信道探测器来进行信道测量。文献[536]使用时域信道探测器来测量海港场景中的信道特性。测量系统收发端均安装了垂直偏振的全向天线。文献[537]利用时域信道探测器在开放海洋环境下开展了信道测量实验。该信道探测器的工作频率为 2.075 GHz，带宽为 200 MHz。测量系统收发端安装了两个垂直偏振天线。由于需要安装于 UAV 上，UAV 信道探测器通常需要满足小型化和轻型化的特点。文献[538]使用 UAV 开展空对地场景中 C 波段和 L 波段信道测量。信道探测器通过收集 PDP 来测量时变的 CIR。在文献[539]中，作者构建了一个时域 UAV 信道探测器，在空对地场景下进行 3.1-4.8 GHz 的信道测量。测量系统收发端均配置全向天线。一般来说，地下矿井的结构可分为隧道矿和室柱矿两类。在文献[540]中，作者使用时域信道探测器在一个室柱式矿井中进行了 3 GHz 的信道测量。测量系统收发端均采用了全向双锥天线。在文献[540]中，作者使用频域信道探测器在隧道矿井中进行了 60 GHz 的信道测量。在收发端均采用了定向 MIMO 天线阵列。

最后，根据应用场景，可以将当前的信道探测器分为超大规模 MIMO、RIS、IIoT 和 ISAC 信道探测器。大规模 MIMO 信道探测器通常配备有大型天线阵列。在文献[542]中，使用超大规模 MIMO 信道探测器开展了 5.3 GHz 信道测量实验。发送天线阵列配备了 8 个全向天线。接收端使用了一个孔径为 4.3 m 的均匀线性阵列 (Uniform linear array, ULA)，天线单元间距为 0.6 个波长。文献[543]搭建了一个超大规模 MIMO 时域信道探测器，在室外体育场进行了 1.4725 GHz 的信道测量。该信道探测器发送端配备了一个具有 128 个天线元件的虚拟 ULA。接收端由 2 个天线组成。文献[544]使用 RIS 信道探测器在 5.4 GHz 下进行 RIS 信道

测量。整个测量系统由发送端、RIS 硬件和接收端组成。系统收发端分别配备了 32 天线平面天线阵列和 64 天线圆柱天线阵列。RIS 硬件由 9 个完全相同的子阵构成。文献[545]通过毫米波 RIS 信道探测器开展室内实验室和办公室环境 RIS 信道测量实验。该信道探测器由一个四端口 VNA、RIS、一个单极子天线和一个天线定位器组成。ISAC 信道探测器包括通信信道探测和感知信道探测两部分。文献[546]在一个汽车车间开展了 SISO 和 MIMO 信道的测量。发送天线的高度设置为 4.5 m，和一般放置无线接入点的高度相当。接收天线的高度分别为 0.3 m 和 1m，以模拟自动制导车辆和无线开关的通信场景。对时域信道探测器的详细描述可参考文献[528]。在文献[547]中，作者利用太赫兹 ISAC 信道探测器在暗室中进行感知信道测量，以验证感知信道的成像精度。其发送天线为一个 140 GHz 的喇叭天线，接收端为一个采样面。为了验证感知目标的检测能力，文献[548]使用 ISAC 信道探测器开展了 26 GHz 信道测量，在发送端使用了 16 天线单元的 ULA，并计算、分析了检测概率。

## 6.2 6G 关键技术仿真实验平台

为了设计和验证新技术，近年来，不同的组织开发了多个 6G 关键技术实验平台。表 12 给出了具有代表性的实验平台概述。

表 12 6G 核心技术实验平台

技术	组织	参考文献	时间	实验平台
毫米波	鲁汶大学	[549]	2022	FORMAT
	隆德大学	[550]	2021	LuMaMi28 (实时毫米波超大规模 MIMO 测试平台)
	PML	[551]	2022	实时光子学辅助毫米波通信系统
太赫兹	东北大学	[552]	2020	TeraNova (THz 频段超宽带无线通信的集成实验台)
	PML	[340]	2022	实时透明光纤-太赫兹-光纤 2×2 MIMO 传输系统
RIS	华中科技大学	[553]	2021	RIS 辅助无线通信的原型
	普林斯敦大学	[554], [555]	2022	全维智能全曲面
	巴黎萨克莱大学	[556]	2022	连续控制反射相位的 RIS 原型机
	萨里大学	[557]	2021	Sub-6 GHz 频段的 RIS 原型机
	成均馆大学	[558]	2021	1-bit RIS 实验平台
	清华大学	[559]	2020	基于 RIS 的无线通信原型
通信感知一体化	华为	[560]	2022	5G-先进 ISAC 技术演示，可感知车辆和人
	华为	[561]	2022	ISAC-OW 原型机 (带有光学无线功能的 ISAC)
	华为	[562]	2022	THz-ISAC 原型机 (THz 频段的 ISAC)
	伦敦大学学院	[563]	2022	基于 OFDM 的 MIMO SDR 实验平台
无蜂窝	爱立信	[564]	2019	无线电条带
	三星	[565]	2022	D-FD-MIMO

				(分布式-全双工-MIMO 系统)
	华为	[566]	2021	以用户为中心的 5G 室内分布式大规模 MIMO 解决方案
	鲁汶大学	[567]	2022	Techtile (开放式 6G 模块化试验台)
	SEU	[568]	2020	基于云的无蜂窝分布式大规模 MIMO 系统
	SEU	[569]	2022	6G-TK $\mu$ 无蜂窝超大规模 MIMO 试验平台
光无线	斯特拉思克莱德大学	[570]	2020	现实世界的混合 LiFi/Wi-Fi 网络部署
	KSLD	[347]	2022	105 Gbps LiFi 演示与 WDM
	三菱	[571]	2021	实时 14 Tb/s 220 m FSO 传输演示
	格拉茨理工大学	[572]	2019	深空 FSO 试验台
	爱丁堡大学	[573]	2019	太阳能电池接收器 OWC 技术的试验台
	云科技	[574]	2019	DCO-OFDM OCC 实验平台

### 6.2.1 毫米波

构建毫米波大规模 MIMO 实验平台是一项重要的工作。在 5G 研究时代, 包括 AT&T、HUAWEI、NTT DoCoMo、纽约大学和英特尔/弗劳恩霍夫等在内的各种组织已经对从 30 GHz 到 100 GHz 的毫米波频段信道特性进行了广泛的测量。根据信道测量和射线追踪结果, 文献[575]中介绍了相应的信道特性与建模。三星<sup>[576]</sup>和高通<sup>[577]</sup>分别在 2014 年和 2018 年推出了 28 GHz 毫米波 MIMO 原型机, 并发表了相应的测量结果。最近, 鲁汶大学提出了一个名为毫米波天线灵活组织与重构 (Flexible Organization and Reconfiguration of Millimeter-wave Antenna Tiles, FORMAT) 的可重构毫米波天线阵列实验平台<sup>[549]</sup>, 旨在提供一个硬件组装解决方案以实现各种天线阵列概念, 从而为 B5G 技术提供有价值的指导。通过在基站和用户终端采用 FORMAT 硬件, 该团队采用 64 QAM 调制建立了一条 28.5 GHz 的无线链路, 可以实现 4.8 Gbps 的下行传输速率。

隆德大学研发了一个名为 LuMaMi28 的实时大规模毫米波 MIMO 实验平台<sup>[550]</sup>。LuMaMi28 由一个具有 16 个收发链路的基站和多个配备有可切换波束的天线阵列的用户组成。该文章还提供了不同实际场景下静态和移动用户的毫米波大规模 MIMO 性能的测量结果。

毫米波对大气衰减敏感, 导致其覆盖范围有限。文献[551]中, 研究人员展示了一种实时光子辅助毫米波通信技术, 可以克服毫米波的穿墙损失, 提高毫米波室内覆盖率。该技术还结合了 Ka 波段的大规模相控阵天线和基于 FPGA 的自动波束跟踪技术, 允许终端在  $\pm 50$  度的最大范围内自由移动。结果表明, 该光子辅助毫米波通信系统可以在 26.5-29.5 GHz 条件下实现 1.5 Gbps 的实时双向无压缩 HD 视频传输。

## 6.2.2 太赫兹

为了应对 6G 信道测量中高达 10 GHz 的带宽，Keysight 和 NI 公司推出了多种亚太赫兹实验仪器以应对多频段、多带宽和多波形种类的实验演示需求。东北大学的研究人员开发了一种名为 TeraNova 的集成实验平台，可进行实际太赫兹频段的超宽带无线通信<sup>[552]</sup>。该系统由一个发射机和一个接收机组成，接收机由一个肖特基二极管倍频器和可以实现 1 到 1.05 THz IF 信号上下变频的混频器组成。研究人员对 1 THz 以上第一个吸收窗口附近的太赫兹信道进行了描述，并对 TeraNova 系统中的热噪声和吸收噪声进行了表征。基于该平台进行的实验也揭示了太赫兹物理层研究尚存多项瓶颈。

光子辅助太赫兹可以打破电子器件的瓶颈，从而引起了广泛的关注。来自 PML 的科研团队在文献[578]中介绍了他们在 325 GHz 处进行的 352 Gbps THz 有线传输实验。该实验采用了由聚碳酸酯基底管和 0.3  $\mu\text{m}$  厚度的镀银膜内层组成的空心芯光纤，并使用了 32 Gbaud PS-4096 QAM 信号，实现了创纪录的 352 Gbps 单线传输速率和 8.6 bps/Hz 的净频谱效率。

此外，文献[340]中还展示了一种基于 370 GHz 的 THz 波段光子上/下转换实时透明光纤-太赫兹-光纤 2 $\times$ 2 MIMO 传输系统，该系统可提供 100 GbE (103.125 Gbps) 的流服务平台，以播放实时电影和实时监控视频。这种光子辅助太赫兹架构展示出了其高频率、大带宽和光学器件低传输损耗的优势，可以被视为未来 6G 中无缝集成光纤-太赫兹-光纤网络的一个潜在解决方案。

## 6.2.3 可重构智能表面

在文献[553]中，研究人员通过现场实验证实了 RIS 的确是一种有望改善通信性能的技术。该文中开发的 RIS 原型机由 1100 个工作在 5.8 GHz 频段的可控元件组成，并利用几何阵列特性和一个实用的接收器-RIS 反馈链路进行配置，与室内场景用铜板代替 RIS 的基准相比，可以实现 26 dB 的功率增益。

正常的 RIS 系统只能处理同一侧反射的信号，这在一定程度上限制了其服务覆盖范围。文献[554]中提出了一种智能全向面 (Intelligent omni-surfaces, IOS)，它可以利用反射和折射特性支持全维度的通信。IOS 的物理结构和相应的试验台如文献[555]所示。文献[556]中提出了另一种可以连续控制入射波相移的 RIS 原型。通过实验测量和全波模拟，文章中还对提出的 RIS 原型的特性进行了表征。

在文献[557]中，萨里大学的研究小组开发了一个工作在 3.5 GHz 频段的风险实验平台。该实验平台由一个 2430 个带有导电贴片的单元电池构成的表面，和一个可以操控表面响应的控制单元组成。该 RIS 实验平台在 Tx 和 Rx 之间没有 LOS 的情况下可以成功配置，实现在不同的入射角下将反射波引向目标。

文献[558]展示了一个由 16 $\times$ 16 个单元组成的 1 bit RIS 实验平台。该平台采用一种基于



压缩感知的自适应波束形成算法，可以操纵接收机的波束朝向，以在不同调制方案下显著提高 BER 和 SNR。文献[559]中同样提出了一个考虑毫米波频段的 RIS 原型机。该原型机由用于参数设置和数据交换的主机、通用软件无线电外围设备以及具有 256 个 2 bit 元件的 RIS 组成。测量结果证实了该 RIS 原型机的有效性，其可以在 2.3 GHz 下实现 21.7 dBi 的天线增益，在 28.5 GHz 下实现 19.1 dBi 的天线增益。

## 6.2.4 ISAC

华为在北京怀柔外场完成了全球首个 5G 先进 ISAC 技术验证，以检验 ISAC 在智能交通和校园侵入检测等各种业务场景中感知车辆和人员的能力<sup>[560]</sup>。测试中采用了毫米波段的 3GPP 5G 信号。在感知资源占比不超过 15% 的情况下，5G ISAC 集成传感器的检测距离超过 500 米，车辆和人的检测准确率均达到 100%，验证了 5G 先进 ISAC 技术在探测距离、定位精度等指标上优于主流交通雷达。

为了满足未来医疗和工业场景的高速通信和高精度感知需求，华为还开发了光无线通感一体化（ISAC with optical wireless, ISAC-OW）技术，并通过原型机进行了验证<sup>[561]</sup>。ISAC-OW 原型机可以通过可见光和红外光学无线链路精确地感知和定位移动机器人，同时通过光学链路在移动机器人和控制器之间传输无线实时 HD 视频。此外，ISAC-OW 原型还可以在无接触的情况下实时监测心率和呼吸状态，检测精度与商业智能手表相当。通过 ISAC 集成波形、硬件架构和信号处理算法设计，该原型机实现了厘米级室内定位和高速无线光通信。

THz 频段用于感知具有高精度、高分辨率以及便携性等优点，因此受到了广泛的关注。华为已建立了适用于 100-300 GHz 频带的太赫兹通感一体化（Integrated sensing and communication at THz band, THz-ISAC）原型机，以探索和验证终端侧高精度感知与成像以及室外中等距离超高速传输的技术可行性<sup>[562]</sup>。测量结果表明，在虚拟孔径的辅助下，该原型机可以实现被遮挡物体的毫米级分辨率成像以及室外中长距离 240 Gbps 高速无线视距传输。

为了验证双功能辐射波形可以同时完成雷达感知和通信功能，伦敦大学学院的研究人员开发了基于 OFDM 的 MIMO 软件定义无线电（Software-defined radio, SDR）实验平台<sup>[563]</sup>。通过开展实际实验，他们成功证明了在保持良好的雷达波束图样的同时，该样机可以实现与纯通信系统相当的 BER 性能，亦即通信性能与纯通信系统相当。

## 6.2.5 无蜂窝网络

作为 6G 网络的有力备选，无蜂窝系统需要通过测试及验证探索其实际实施的局限性。爱立信在 2019 年开发了一种可对信号进行串行处理的分布式 MIMO（无蜂窝 MIMO 系统的另一个名称）部署网络，名为“radio stripes”<sup>[564]</sup>。三星在文献[565]中提出了一种分布式全双工 MIMO（Distributed-full duplex-MIMO, D-FD-MIMO）系统。该系统在基站采用 2D 平

面天线阵列，以便于利用仰角和水平角域的信道多样性。华为于 2021 年部署并测试了以用户为中心的 5G 室内分布式大规模 MIMO 解决方案<sup>[566]</sup>，成功地将用户体验速率提高了 30%，同时保持了稳定的用户移动期间 Gbps 速率体验。鲁汶大学、林雪平大学、爱立信等科研机构在 2021 年联合推出了一个名为 REINDER 的智能连接平台项目<sup>[12]</sup>。该项目致力于设计具有分布式智能的无蜂窝协议和实时真实空间交互应用程序处理算法，并实现高效、可扩展性和安全连接。在该计划的资助下，2022 年研究人员在文献<sup>[567]</sup>中提出了一个名为“Techtile”的开放 6G 模块化实验平台，用于通信、感知和联合学习。Techtile 拥有 140 个分布式计算资源单元，以及 SDRs、传感器和 LED 资源。它不仅可以用于评估不同的网络和计算拓扑（本地与中心），还可以用于开展超连接交互技术的实验研究。为了解决无蜂窝网络的可扩展性和同步问题，该实验平台的所有模块都基于以太网进行连接、同步和供电，每个模块都配有 SDR 和电源。这种灵活的结构还允许模拟不同的分布式结构，例如网格或树。

SEU 团队在文献<sup>[568]</sup>中介绍了一个基于云的无蜂窝分布式大规模 MIMO 系统，该系统支持在高达  $128 \times 128$  天线规模、10.185 Gb/s 吞吐量和超过 100 b/s/Hz 频谱利用率的 MIMO 场景中进行演示。基于该实验平台，研究者们设计了基于贝叶斯网络的统一基带信号处理器<sup>[579]-[580]</sup>，并对相关的专用集成电路（Application specific integrated circuit, ASIC）芯片进行了流片与测试。此外，他们构建了 6G-TK $\mu$ 无蜂窝大规模 MIMO 实验平台<sup>[569]</sup>。该实验平台包括基于商用 4.9 GHz 远程无线电单元（Remote radio units, RRU）的无蜂窝大规模 MIMO 测试系统，以及可扩展大规模分布式相控阵测试系统。通过使用灵活的框架结构，该实验平台可以在 134  $\mu$ s 内实现 RRUs 和终端之间的空口校准。此外，该实验平台还可以实现 16 个数据流的并行传输，频谱效率可超过 200 bps/Hz。

## 6.2.6 光无线通信

OWC 为未来 6G 系统提供了一条使用 RF 频谱之外的频谱资源实现通信的直接途径，可以使用广泛存在的光发射器和接收器设备。OWC 中的实验平台可分为三类：被称为 LiFi 的室内移动多用户无线网络、主要用于室外的点对点 FSO 和使用嵌入式摄像头作为数据检测器的 OCC。

埃因霍温大学使用分散波束控制架构在多用户场景中实现了高达 40 Gbps 的用户数据速率<sup>[581]</sup>。复旦大学拥有众多 VLC/LiFi 测试平台和实验系统。最近，一个来自复旦的研究小组演示了具有 Tomlinson-Harashima 预编码的 VLC MIMO 链路<sup>[582]</sup>。pureLiFi 有限公司与斯特拉斯克莱德大学的光保真技术研究与发展中心（LiFi Research and Development Centre, LRDC）合作，为教室开发了 LiFi 实验平台，并在实际环境中演示了实时切换、多用户访问和移动性支持等功能<sup>[570]</sup>。LiFi 可同时实现高速数据传输和 LiDAR。基于激光设备，京瓷 SLD 激光有限公司（Kyocera Soraalaser, KSLD）对 LiFi 的上述功能进行了验证<sup>[347]</sup>。KSLD 和 LRDC 之间开展合作，推进了一种波分复用（Wavelength division multiplex, WDM）LiFi

演示器的开发。该演示器能够利用可见光和红外光实现 105 Gbps 传输，并已在 2022 年国际消费类电子产品展览会上展出<sup>[583]</sup>。

FSO 可用于构建高速地面回程网络，并确保 6G 泛在可用。德国航空航天中心（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR）与 ADVA 光纤网络合作，通过商用相干光纤收发器，展示了相隔 10.45 km 两地间高达 13.16 Tb/s 的数据传输<sup>[584]</sup>。日本三菱电机公司展示了 FSO 在 220 米距离处的 14 Tb/s 数据传输能力<sup>[571]</sup>。演示过程中使用了尺寸为 3×3 阵列的 2D 光学发射器阵列，以确保系统符合 I 级眼睛安全规定。中科院太空应用重点实验室的一个研究小组在 2.1 公里的水平大气链路上演示了 100 Gbps 数据速率的实时 FSO 链路<sup>[585]</sup>。文献<sup>[572]</sup>中同样展示了一个深空 FSO 技术实验平台。该实验平台基于光纤技术实现传输链路（工作波长为 1550 nm），由自研信道仿真器、背景噪声模块和作为接收器的超导纳米丝单光子探测器（Superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD）构成。在最近的研究中，太阳能电池片被认为可用作低成本 FSO 系统的高速检测器。这是因为大规模 MIMO 太阳能电池板构成了非常大的接收器孔径，从而免去了波束捕获和跟踪单元<sup>[573]</sup>的高额开销。

OCC 使用嵌入式摄像头建立基于光的无线链路，得益于光学传感器的特性，可以实现高达 1 Mbps 的数据速率。OCC 的优势在于智能手机中已经集成了摄像头传感器。OCC 利用相机传感器的滚动快门效应来实现比相机的典型帧速率高几个数量级的数据速率。文献<sup>[574]</sup>中，研究人员开发了一种使用直流光正交频分复用（Direct current optical orthogonal frequency division multiplexing, DCO-OFDM）的 OCC 实验平台。

### 6.3 6G 系统综合实验平台

在 6G 中，通信系统不仅将承担多频带、多维度和高性能的通信需求，还将集成通信、感知、计算和 AI 等新功能<sup>[586]</sup>。为了评估 6G 通信系统的关键性能，如吞吐量、频谱效率和时延，需要搭建实际的 6G 数据测试平台。因此，来自 PML 的一组研究团队构建了一个名为“TK $\mu$ ”的 6G 综合实验验证平台<sup>[587]</sup>。该实验平台主要包括无蜂窝超大规模分布式 MIMO 通信、RIS 辅助 6G 无线通信、空地综合通信、毫米波/太赫兹通信和分级智能等多个部分。可验证其能够达到 Tbps 级峰值速率、kbps/Hz 级频谱效率、 $\mu$ s 级延迟以及内生安全性和智能性。其中，无蜂窝超大规模分布式 MIMO 采用了物理层下沉、前端网络和去中心化合并来实现，这能够打破传统蜂窝架构中的边界效应。该无蜂窝架构集成了超大规模 MIMO 天线，以确保 kbps/Hz 级频谱效率。除此之外，RIS 辅助 6G 无线通信也被纳入“TK $\mu$ ”6G 综合实验验证平台中，以提高 EM 辐射的覆盖范围和信道矩阵的秩，并消除信号干扰、聚焦能量、提高定位精度、改善信息和电力传输等。由于地面网络的覆盖范围和网络容量有限，其已不能满足爆炸性增长的随时随地高速可靠网络接入的需求。因此，空地综合通信在学术界和工业界得到了广泛的关注<sup>[588]</sup>。“TK $\mu$ ”6G 综合实验验证平台将结合空地海一体化技术，以期实现全覆盖。此外，与 sub-6 GHz 相比，毫米波和太赫兹频段可以提供足够的带宽以提升通信



的峰值速率。先前工作表明，毫米波/太赫兹波段适用于移动、回程和室内无线通信<sup>[589]</sup>。因此，“TKμ”6G综合实验验证平台进一步考虑了毫米波与太赫兹技术，可以保证Tbps级的峰值速率和μs级的时延。分级智能是一个分层智能集成网络，由数据驱动的边缘智能中心和网络智能云平台组成。通过使用云、雾和边缘计算技术，数据驱动的边缘智能中心可以直接与通信网络交互，并处理生成的数据，以保障内生安全及内生智能。此外，数据驱动的边缘智能中心还将与网络智能云平台共享通信数据，以便对其进行进一步处理。

此外，由中国移动研究院和北京邮电大学组成的联合研发团队设计并开发了6G通用原型平台<sup>[591]</sup>。该系统采用了通用基带平台，支持包括可见光在内的多个操作频段，并融合了通信和AI等多种功能，可支持灵活扩展和基于云的各种技术。该系统可对各种6G关键技术进行联合验证，以辅助技术的升级换代，并为6G标准化技术解决方案提供参考。该系统为每个算法模块提供了完全开放的E2E链路，并通过算法结构优化、AVX512汇编指令优化和多线程优化来提高原型平台的效率。此外，该系统实现了基带异构加速和开放模块能力，其VLC链路还具备多重联合处理与聚合能力。接下来，联合研发团队将继续升级该系统，并进一步探索多功能融合的6G通用原型验证系统的新型软硬件开放架构。此外，该系统还将被作为公共验证平台，覆盖6G关键技术研发、标准化和产业化的全过程，以探索6G发展新路径。

华为6G研究团队在文献<sup>[592]</sup>中发布了他们的70GHz短距离通信原型机，可以实现超低功耗、超高吞吐量和超低时延等通信指标。短距离通信利用毫米波和太赫兹等高频带实现真正的沉浸式体验，允许用户设备在通信链路的“最后一米”上自由移动，从而为基于XR和全息通信的沉浸式交互业务等场景提供极致的连接服务。华为6G研究团队采用了低功耗极性编码/解码、低功耗1位ADC和高速短程相控阵自适应波束扫描等多项先进技术，实现了超过10Gbps的通信吞吐量和亚毫秒级时延，以及实时4KVR服务。总功耗小于560mW的情况下，该原型机短距离传输速率仍可达到有线通信方式的数倍。

## 第七章 6G 未来挑战

### 7.1 基础理论研究

为了实现“全覆盖、全应用、全频谱、全感官、全数字、强安全”的 6G 愿景，很多问题和研究方向需要进一步的探索。而且，6G 通信理论亟待突破。这些研究方向给 6G 研究带来了挑战和新的机遇并总结在图 11 中。在本部分中，我们将首先讨论基础理论方面的挑战，即新型信道研究、电磁信息论、统一基带信号处理和 6G 性能指标折中。然后，我们将分析并指出未来的研究方向和关键挑战，以接近 6G 愿景。最后，我们将介绍整个 6G 通信系统研究面临的挑战，包括实现绿色节能网络和为 6G 发展建立实验平台。



图 11 6G 未来研究方向和挑战

#### 7.1.1 新型信道研究

传统的信道研究通常遵循信道测量、信道参数估计、信道特性分析和信道建模 4 个步骤。这种被动的信道认知方式存在诸多局限。信道测量耗时长、成本高。此外，现实中的信道测量永远无法覆盖所有频段或场景。数据量大和计算复杂度高也给信道参数估计带来了挑战。信道特性只能在已知频率和已知场景下进行分析，无法充分挖掘新特性与频率/场景之间的复杂关系。最后，传统的信道建模无法预测未来未知频段/场景的信道特性。对于 6G 而言，信道研究需要从被动识别信道发展到主动识别信道，包含 6G 标准化普适信道建模<sup>[522]</sup>、

基于 AI 的 6G 预测信道建模<sup>[593]-[596]</sup>、场景自适应信道建模和 RIS 信道建模<sup>[597], [598]</sup>。

### 7.1.2 电磁信息论

电磁理论和信息论是无线通信的两大理论基石。电磁理论是关于电磁波的产生和传播的理论。信息论是关于带宽、功率受限条件下准确且有效传输信息的理论。电磁理论基于连续的时间和空间，可以获得全空间的电磁场分布，但是，仅使用电磁理论无法计算信道容量。信息论可以用来计算离散空间信道容量，但不能计算连续空间信道容量。电磁理论和信息论通过天线理论和无线传播信道建模理论联系在一起。特别地，无线传播信道源自天线并通过电磁波传输信息，是连接电磁理论和信息论的桥梁。这四个经典理论之间的关系如图 12 所示。

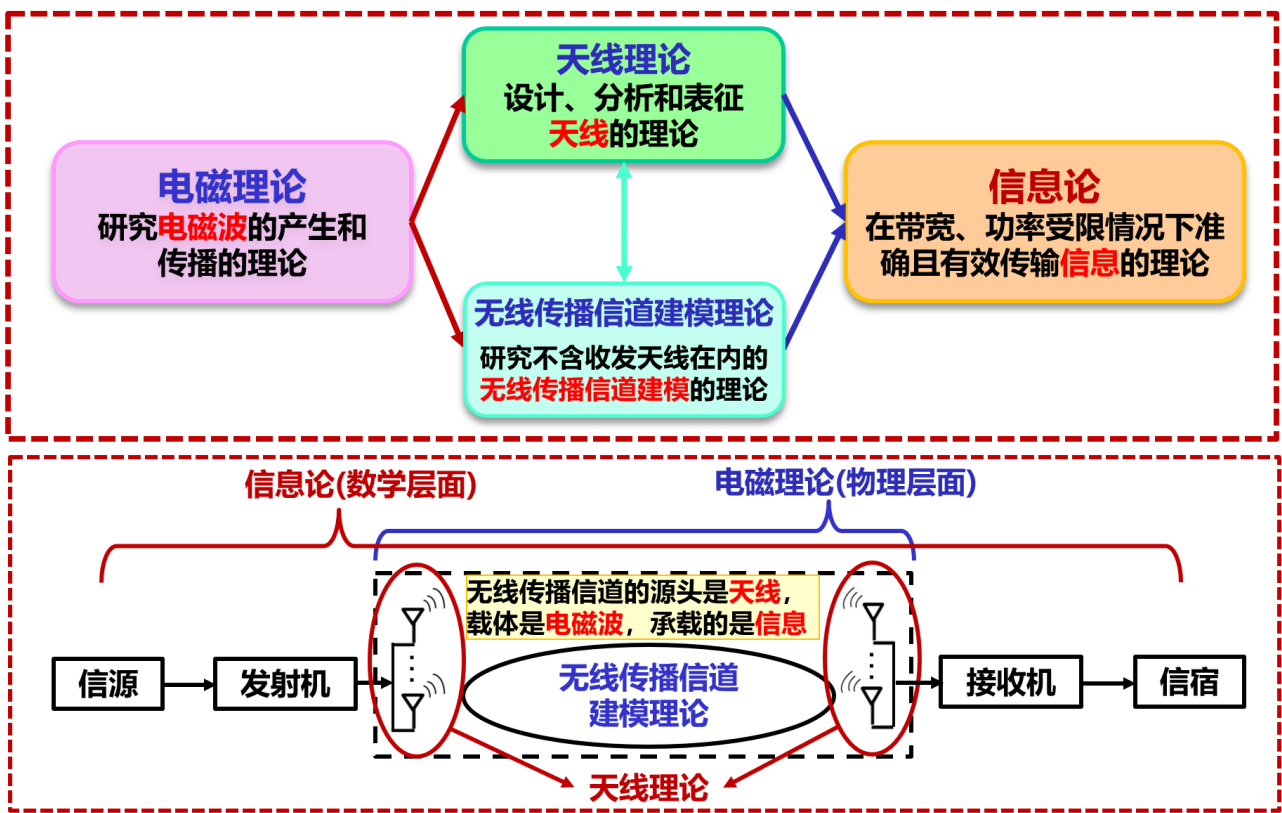


图 12 电磁理论、信息论、天线理论和无线传播信道建模理论之间的关系

需要注意的是，随着 6G 关键技术的发展，上述理论的独立使用已无法解决一些问题，这给上述理论的融合带来了挑战和机遇。例如，随着 6G 无线通信网络从陆地覆盖扩展到空-天-地-海一体化网络的全球覆盖，用户、基站、中继和/或 RIS 的数量不断增加。基站和用户 在低轨卫星、UAV 和车联网等移动网络中的位置往往会不断变化。因此，6G 无线通信网络 呈现出从离散空间向连续空间演进的趋势，需要在连续空间中的任何位置获取 CSI 并计算信 道容量，以便于系统设计。在这种情况下，需要对上述四种理论进行有效融合。此外，随着 超大规模 MIMO 中天线的尺寸和天线单元的增加，Tx/Rx 天线将与环境的关系更加紧密。换言

之，Tx/Rx 天线和无线传播信道变得不可分割，因此，天线理论和无线传播信道建模理论的融合是必要的。此外，随着全息 MIMO 中天线单元间距的减小，天线阵列从离散孔径向连续孔径演进，这对信道表征和天线设计提出了新的要求。因此，亟需融合上述四种理论。综上所述，与 5G 相比，6G 无线通信网络提出了新的应用和技术要求，超出了单一理论的适用范围。经典理论的发展遇到了瓶颈。因此，迫切需要研究电磁理论与信息论的融合，即电磁信息论<sup>[599], [600]</sup>，这将作为 6G 无线通信网络的理论基础，并有助于实现新的理论突破。

### 7.1.3 统一基带处理

信道编码具有纠错能力，在通信系统中一直扮演着不可或缺的角色。为了满足 6G 通信系统中灵活多变的应用场景，增强的编码方案和简化的译码算法及其统一实现至关重要。然而，仅关注单个信道编码模块的优化有时不足以满足 6G 提出的严格要求，更重要的是要从更广泛的研究角度来设计和实现整个基带处理。

**迭代联合基带处理：**迭代接收机长期以来被认为比现有的单独基带处理具有更高的系统容量和链路可靠性<sup>[601]</sup>。他们在两个或多个信道估计器、MIMO 检测器、NOMA 检测器、信道解码器和信源解码器之间迭代交换软信息<sup>[602]-[609]</sup>。然而，多次迭代会导致各模块使用量的增加，进而给系统带来高延迟和高计算复杂度的负担。由于大多数模块致力于解决最大后验估计问题，因此可以通过利用它们的相似性在统一的贝叶斯网络中进行处理，从而提高迭代接收机的频谱效率。由于信号流是串行的，另一种方法是将多个模块看作一个整体，最终输出作为估计对象进行联合处理，如联合检测和解码<sup>[610], [611]</sup>。

**基带处理统一架构：**基于基带处理的迭代或联合处理、高效的统一硬件架构设计和相应的实现对于满足不同的实际应用是非常必要的。在 6G 之前的通信系统中，各个模块的设计和实现是孤立的，缺乏系统级的设计思维会造成额外的硬件资源开销。为了提高 6G 基带处理实现的灵活性、兼容性和硬件效率，可以采用超大规模集成电路（Very large scale integration, VLSI）数字信号处理（Digital signal processing, DSP）方法<sup>[612]</sup>，包括重定时、折叠和展开，设计具有固定处理单元、优化网络互连和迭代时序的统一架构。

**基带处理的硬件自动生成：**随着 6G 通信系统中应用的多样化和复杂化，定制的基带处理电子设计自动化（Electronic design automation, EDA）工具是必不可少的，其可以降低各种场景下电路设计的门槛，实现客户需求。一个设计良好的 EDA 工具可以根据客户要求的性能表现自动生成电路设计。基于统一的贝叶斯网络，可以将大部分处理单元形式化以加速自动生成方法，并在此基础上为配置硬件中的最佳参数创造设计空间<sup>[613], [614]</sup>。面对复杂的需求，AI 可以帮助探索设计空白。它还可以帮助确定自动生成硬件设计中的近似补偿参数、量化方案和迭代方案<sup>[452]</sup>。

## 7.1.4 6G 性能指标折中

如今，关于通信系统 KPI 折中的研究已经广泛开展，但现有的研究成果主要集中在 SE、EE、容量、时延等指标上，而对 6G 中提出的新 KPI 研究有限。因此，研究所有 6G 指标之间的内在联系和权衡是一个很有前景的方向。此外，6G 应用场景众多，但系统资源不足以让每个应用场景在各个方面都有着良好表现。已有工作分析了不同 6G 应用场景下 KPI 的技术需求，但针对特定场景下的通信系统 KPI 折中仍存在研究空白。此外，随着 6G 通信中频段越来越高，超大规模 MIMO 等 6G 通信技术日趋成熟，香农信息论在系统性能分析中的重要性逐渐凸显。有必要从信息论的角度分析天线、编码等因素对时延、可靠性、容量等 KPI 的影响，为 6G 通信系统的设计和部署提供指导。

## 7.2 实现 6G 愿景面临的挑战

### 7.2.1 空天地海一体化网络

空天地海一体化网络是实现 6G 全球覆盖愿景的必然趋势和关键技术。然而，空天地海一体化网络仍在开发中，而且在网络规划、建设、维护和优化方面仍有许多理论和工程问题需要研究。首先，通信信道是通信系统和网络后续研发的基础。不同的频带和场景给信道测量和建模带来了巨大挑战，有必要考虑如何将卫星<sup>[615], [616]</sup>、UAV<sup>[617], [618]</sup>、海洋<sup>[619], [620]</sup>和地面场景中的独特信道特性融合到普适信道模型<sup>[74]</sup>中。此外，空天地海一体化网络的架构设计、移动性管理、网络协议、资源分配、路由策略、能效增强等问题也迫切需要创新。有必要设计一个安全高效的网络架构，以便各种通信系统能够顺利融合，为用户提供可靠和安全的通信服务<sup>[621]</sup>。集成网络的高效、安全和匿名认证协议也非常重要<sup>[622]</sup>。考虑到各种场景中不同类型的移动性，需要创新的移动性管理解决方案来实现同构和异构网络之间的无缝移动性管理<sup>[52]</sup>。此外，在设计网络协议、资源分配和路由策略<sup>[52], [623]-[625]</sup>时，需要考虑空天地海一体化网络中高移动性和动态网络拓扑的特点。在网络维护和优化方面，有必要考虑通信平台的供电以及航天和航空相关网络中 UAV 和其他设备的负载，这对网络的整体能效有很高的要求。同时，有必要考虑如何在网络性能改善和成本之间做出权衡<sup>[626]</sup>。此外，如何使用 AI、DL 和其他智能技术来优化网络架构并提高整体网络性能<sup>[217], [627]</sup>也是当前的挑战之一。

### 7.2.2 射频/光异构混合网络

为了实现 6G 全频谱的愿景，不同频带的系统（包括 RF 和全光无线频带）将被融合，以实现支持所有频带的异构混合系统和网络。RF/光异构混合网络覆盖一系列混合网络，其应用涵盖各种场景，例如室内、室外车联网、自由空间和水下场景<sup>[73]</sup>。主要有两类混合网络，其一是 RF/光混合系统，其中包括毫米波/VLC 系统、室内 WiFi/LiFi 和水声/光通信；其二是

光/光混合系统，其中包括 VLC/OCC 和 FSO/OCC。然而，RF/光异构系统和网络的实现面临一系列挑战。一方面，与其他异构网络（如空天地海一体化网络）一样，RF/光异构网络面临异构网络的共同挑战，包括移动性管理（网络交换）、传输网络协议设计、负载平衡、异构网络同步、资源分配和能效提升<sup>[628]</sup>、频谱分配<sup>[629]</sup>以及联合接入点和功率分配<sup>[630]</sup>。另一方面，由于 RF 和光波段之间的巨大频率差距，RF/光异构网络需要解决几个特殊的挑战。首先，有必要考虑 RF 和光通信网络中具有不同特性的收发器。例如，当用户移动时，接入点的异构性给频繁切换带来了巨大挑战<sup>[631]</sup>。混合系统需要集成光电特性并满足不同传输介质的不同带宽要求，这给 RF/光学硬件系统和信道模型的融合带来了极大的困难<sup>[522]</sup>。其次，不同光无线网络的网络选择标准通常不同，这也不同于现有的 RF 通信网络。有必要考虑如何设计最佳网络选择策略<sup>[73]</sup>。此外，由于终端设备的能量有限，移动性对上行链路 OWC 的影响较大，以及上行链路 OWC 对照明的干扰，上行链路 OWC 仍存在很大的限制<sup>[73]</sup>。最后，异构系统带来的系统安全挑战不容忽视<sup>[632]</sup>。

### 7.2.3 AI 使能的无线通信网络

近年来，AI 技术的快速发展极大地推动了 B5G/6G 无线通信的发展。在 6G 时代，为了实现 AI 赋能的智能无线通信网络，网络 AI 是一项重要的支撑技术，它在网络中提供了完整的 AI 环境，包括 AI 基础设施、AI 工作流逻辑、数据和模型服务等<sup>[633]</sup>。值得注意的是尽管 AI 技术正在快速发展，前面提到的一些新技术可能有助于网络 AI，但它仍处于研究的早期阶段，仍有许多问题需要探索 and 解决。首先，数据是无线网络 AI 研究的基础。因此，如何在无线网络中收集和使用数据，并建立共享数据集进行研究是需要解决的首要问题<sup>[317]</sup>。在将 AI 应用于网络时，还需要关注 AI 服务的性能，通过选择 AI 算法和网络资源分配，可以实现更好的 AI 性能。关键挑战是建模 AI 性能与网络配置之间的关系，以及适应网络动态的在线网络配置方案<sup>[634]</sup>。此外，注意到更先进和更精确的 AI 模型通常会消耗大量能源，并产生显著的环境成本，迫切需要研究如何在大规模部署 AI 服务之前提高能效并降低能耗和成本<sup>[635]</sup>。最后，尽管 AI 技术有许多优点，但隐私和数据安全问题也需要认真考虑。未来，网络中数据收集、数据传输和数据分发的动态性质将导致用户信息泄露的风险，给网络的隐私和安全带来巨大挑战<sup>[636]</sup>。

### 7.2.4 通感算一体化网络

6G 网络将实现移动通信、智能感知和计算能力服务的集成，并实现高级别集成和相互增强<sup>[241]</sup>。通感算一体化网络是一种通过集成三种技术而开发的新型综合网络。当前的研究主要集中在 ISAC 和计算网络的基础工作上，如波形设计和信号处理<sup>[482]</sup>、传感移动网络<sup>[637]</sup>、ISAC 中的网络级传感<sup>[638]</sup>、计算能力卸载<sup>[639]</sup>、多层计算能力资源的协作<sup>[233]</sup>、<sup>[237]</sup>、<sup>[239]</sup>以及用于多层泛在计算网络的云边缘终端资源分配。对于通感算一体化网络，未来仍有许多挑

战，包括 ISAC 技术、网络感知技术和通过通感算的集成实现的计算能力网络技术的发展<sup>[241]</sup>。为了实现具有通信、感知和额外计算的网络传感，接入网络和核心网络都需要具有通信、感知和计算能力。因此，对收发器和处理模块、拓扑、介质访问控制、路由算法和资源分配提出了要求。此外，多点联网协作感知和定制感知需求也是需要考虑的问题。最后，在多层泛在计算网络的基础上，还需要研究如何通过网络感知功能为分布式计算能力的优化调度决策提供丰富的先验信息。反过来，通过实时共享的分布式计算能力为感知数据执行定制的特征提取和信息融合是一个挑战。此外，如何通过增强的通信性能来提高泛在计算能力也是未来需要探索的有趣问题。

### 7.2.5 内生安全网络

在未来的 6G 网络中，将引入各种安全技术，如区块链、物理层安全、模拟防御网络和安全多方计算，以实现内生安全网络。这些多样化的技术带来了机遇，同时也带来了许多挑战。例如，现有一系列关于物理层安全的理论研究<sup>[640]-[642]</sup>，然而此类技术尚无法实现大规模的实际应用。现有网络框架带来的障碍、底层空中接口的可扩展性、网络资源的限制以及多样化的新场景给物理层安全技术带来了巨大挑战<sup>[643]</sup>。近年来，模拟防御网络也引起了广大学者的研究兴趣，它使用动态异构冗余架构和负反馈机制来提高系统处理未知威胁的能力<sup>[644]</sup>。然而，无线内生信息安全、无线内生功能安全等问题仍需进一步探讨<sup>[230]</sup>。此外，安全多方计算是一种前沿的密码技术。其未来的研究挑战包括适用于不同场景<sup>[645]</sup>和恶意模型环境<sup>[646]</sup>的安全多方计算技术，以及高效和安全的多方计算协议、恶意安全协议和特定应用的特殊安全协议<sup>[647]</sup>。

### 7.2.6 沉浸式交互网络

提供全感官应用服务是 6G 网络的一个重要愿景，而沉浸式交互网络是满足这一愿景的重要技术。它将传输多感官信息，包括视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉信息，从而为用户提供近乎真实的虚拟体验。沉浸式交互网络的目标是实现新应用的实时控制，如沉浸式云 XR、全息通信、智能交互和感官互联<sup>[32]</sup>。当前的通信网络主要传输视觉和听觉信息。6G 时代的沉浸式交互式网络需要传输触觉、味觉和嗅觉信息，这对网络的传输速率、可靠性和时延有极高的要求。目前，沉浸式交互网络的研究还处于起步阶段。一些现有的研究包括触觉互联网的网络架构、性能指标和愿景<sup>[91], [648], [649]</sup>、人体体征通信使能技术<sup>[650]</sup>、沉浸式业务的可能技术和优化方案<sup>[651]</sup>，以及触觉数据传输的高速无线通信协议的适配<sup>[652]</sup>，但还有很多空白需要填补。未来，沉浸式交互网络的技术挑战主要包括两个方面，即多模态信息的获取和传输以及高性能智能网络的实现。一方面，与视觉和听觉信息相比，获取、存储和传输触觉、味觉和嗅觉信息等感官信息仍然具有挑战性。另一方面，沉浸式交互网络将传输大量多感官数据。因此，有必要根据具体场景和业务逻辑来协调控制对并发数据流传输。此外，诸



如确保网络延迟要求、设计适用的网络路由以及在大量数据下保证系统安全等问题都是相当具有挑战性的。目前，引入边缘计算<sup>[653], [654]</sup>、ML<sup>[649], [655]</sup>等技术来有效提高网络的智能水平和性能也是一个热点问题。

## 7.2.7 数字孪生网络

数字孪生是支撑 6G 全数字愿景实现的关键技术。一方面，从 5G 发展而来，性能大幅提升的 6G 网络将提供一系列新颖的数字孪生应用，如数字孪生体域网<sup>[52]</sup>和数字孪生城市<sup>[95]</sup>。另一方面，将数字孪生技术应用于通信网络可以通过物理网络和孪生网络之间的实时映射和交互，加速实现更安全、高效、智能和可视化的 6G 网络。网络数字孪生的愿景对网络提出了高要求，包括全息网络 VR 交互映射、全生命周期管理和实时闭环控制<sup>[656]</sup>，这也给网络数字孪生实现带来了一系列困难。首先，6G 网络将包含与复杂网络拓扑连接的大型网络元件。因此，实时模拟真实的物理网络是一个巨大的挑战。特别是，无线信道数字孪生是网络数字孪生中不可或缺的一部分。实时和准确的场景自适应信道模型需要考虑如何实时准确地描述传播环境以及如何预测无线信道的可能未来变化。此外，考虑到网络中不同制造商设备的技术实现和支持功能的不一致性，应注意数据采集、处理和建模过程中网络设备的兼容性<sup>[656]</sup>。此外，大规模的 6G 网络给数据采集、存储、管理和处理带来了巨大挑战，需探索如何在大规模网络中数学地构建复杂的网络拓扑关系<sup>[656], [657]</sup>。

## 7.3 系统研究

### 7.3.1 绿色网络

自 5G 以来，绿色通信和可持续发展在全球范围内引起了研究人员的关注。随着 6G 技术、应用和社会认知的进一步发展，绿色网络的概念受到越来越多的关注。能源中性设备的开发有望使通信系统更加节能，并实现终端功耗有限的新应用场景，如物联网、卫星通信和 UAV 通信。此外，从环境和经济的角度来看，发展绿色网络也是非常必要的。绿色网络需要实现低电磁场，其目的是减少电磁排放的威胁并避免任何健康影响。因此，有效评估、测试和控制电磁场安全性已成为 6G 规模部署的紧迫问题之一。此外，需考虑如何研究和开发接近零功耗的技术，如 RF 能量采集、反向散射和低功耗计算，这些技术有助于打破电池容量限制，实现环境友好的网络。此外，AI 技术使用大量数据来训练网络，消耗大量计算资源和能源，不利于可持续发展<sup>[658]</sup>。因此，绿色 AI 技术正受到越来越多的关注，该技术可以在不增加计算复杂度的情况下获得新的结果<sup>[659]</sup>。考虑到计算复杂性，需要考虑硬件设计和网络部署问题，为 6G 绿色通信设计节能 AI 模型至关重要<sup>[660]</sup>。



### 7.3.2 6G 实验平台

6G 的一些应用场景，如太赫兹、光通信、超宽带、超高速传输和超大规模 MIMO，给信道探测器的建设带来了挑战。用于高频段（例如太赫兹和可见光频段）的功率放大器很难制造。此外，信道探测器的测量带宽受到模数转换器（Analog to digital converter, ADC）和数模转换器（Digital to analog converter, DAC）的采样率的限制。同时，如何将高速 ADC 生成的数据实时存储到磁盘阵列是另一个难题。在超高速传输场景中，需要高速信道快拍重复率。在超大规模 MIMO 场景中，需要信道探测器来支持大量信道。一种低成本的解决方案是使用高速固态开关进行信道扩展。然而，这种方法会延长单个信道快照的测量时间，需要考虑如何确保切换的同步。

此外，随着 6G 研究的不断发展，越来越多的仿真平台已经建立起来，以验证各种 6G 关键技术的基础理论和实用性，并发现实际应用中的缺陷和局限性。从目前各种 6G 关键技术的实验平台可以看出，各种通信技术融合是必然的发展趋势。ISAC 结合太赫兹带来了高通信数据速率和高传感精度，而毫米波和光接入网络的结合可以克服墙壁损耗，从而带来更大的覆盖面积。面对 6G 的高 QoS 要求，使用不同频段和网络架构的关键技术的不同组合将成为一个有前途、有创意和具有挑战性的研究方向。如何找到正确的组合以及如何正确地为这些组合技术构建测试平台将成为未来发展的挑战。

此外，6G 综合实验平台是一个复杂的通信系统，需要验证所有 6G 关键技术。因此，系统需要根据 6G 关键技术的发展不断升级。然而，对于 ISAC、RIS、超大规模 MIMO 天线、OWC、AI、空天地海一体化网络和边缘智能平台等应用于 6G 的关键技术，当前研究尚不明确。因此，6G 综合实验平台需要随着关键技术的演进而更新发展。而且，大量的通信数据对智能云平台的处理能力提出了更高的要求。如何进一步探索和存储集成了强大数据处理能力的 6G 综合实验平台的新软硬件开放架构，并将该系统用作公共验证平台，是未来需要考虑的问题。

## 第八章 经验教训与总结

### 8.1 经验教训

考虑到“无缝全球覆盖”这一具有挑战性的愿景，协调遵循不同传播特性的频段，提供引人注目的远程呈现风格的全感官元宇宙应用，同时保持根本的安全性和通信方的匿名性，6G 网络无疑将扩展传统的通信服务。基于对 6G 研发的深入调查，如图 13 所示，我们总结了一些经验教训，具体如下：



图 13 经验教训

1. **基于场景的设计**：6G 网络将在现有通信服务方面提供实质性的性能改进。然而，它们也将丰富通信领域之外的服务，并在感知、定位和空中计算等方面创造全新的优势。这些将为工业“垂直领域”的无缝融合铺平道路。5G 系统已经认识到复杂应用场景的广泛异质需求，因此引入了增强型移动宽带、大规模机器类通信和高可靠低时延通信操作模式。根据其极为苛刻的规格要求，预计 6G 系统将进一步扩展操作模式，以支持更具体的场景和“垂直工业”应用。这需要非常精细的多变量优化工具，这些工具能够找到所有所谓的帕累托最优工作点<sup>[66]</sup>。更明确地说，不是简单地设置例如最大可发射功率和最大中断概率作为约束，优化网络的和速率作为单变量目标函数，而是必须共同优化这三者。这个复杂的随机优化问题会找到所有的最佳工作点。因此，在不降低至少一个其他指标的情况下，上述任何一个指标都无法得到改进。作为一个明显的优势，系统控制器总是为特定的应用场景激活最合适的操作模式。

2. **合理规划研发与部署:** 6G 使能技术大致可分为两类, 即基于 5G 的演进和全新技术。一方面, 每种使能技术都有其自身的优势和劣势, 必须对其进行批判性地评估。另一方面, 近年来开发了一系列新的 6G 使能技术, 这些技术已达到不同的阶段。正如在第六章中所讨论的, 太赫兹、RIS 和无蜂窝解决方案等技术已经进入了技术验证阶段, 而数字孪生、语义通信和元宇宙等技术还远远没有达到能够通过平台验证的成熟度, 因此需要进一步的深入研究。建议合理规划研发和部署, 降低成本, 最大化 6G 网络能力。
3. **重视基础研究:** 基础研究是 6G 研究的重要支柱之一, 为 6G 的一些突破铺平了道路。例如, 针对各种频段和场景的无线信道测量和建模将为 6G 信道模型、总体技术规范和架构的标准化奠定基础。电磁信息论的最新进展也将为 6G 技术的应用提供新的基础。
4. **AI+6G 互惠融合:** 人工智能技术将被深度融合到 6G 网络的所有开放系统互连 (Open System Interconnection, OSI) 层中, 它们将以共生的方式相互影响。例如, 一方面, AI 技术可以帮助提高 6G 网络的智能化水平。另一方面, 由于人工智能的辅助, 网络将获得更好的性能, 特别是在面对不确定性时, 例如其学习能力用于救援服务时。然而, 它们的协调发展还需要进一步的研究。
5. **关注绿色技术和效率指标:** 从研究到前期开发和网络推广, 以绿色和环保设计为目标是至关重要的。人们普遍认为, 鉴于电信流量的不断增加, 保护环境和控制成本从未像现在这样重要。一方面, 我们应该依靠复杂的联合信息和能源网络, 认真研究能源中性设备和绿色网络的概念<sup>[662]</sup>。另一方面, 效率指标应作为 6G 系统研究和设计的一个至关重要的问题。
6. **呼吁国际合作:** 为了实现全球无缝漫游, 我们必须瞄准全球标准和全球统一的 6G 生态。这就需要 6G 的国际合作与发展。

## 8.2 总结

总之, 6G 将通过引入新的应用场景丰富全球通信服务, 带来新的技术体验并提高经济增速。我们批判性地评价了最近在大量相关文献中涌现的解决方案, 强调了相关技术的发展和挑战。我们讨论了 6G 的相关愿景, 指出 6G 将从六个方向发展, 以全球覆盖为目标, 依靠广泛的频谱、有吸引力的应用, 刺激所有人的感官, 同时具有泛在数字智能和强大的安全性。然后, 我们讨论了 6G 关键性能指标和应用场景, 为 5G 提供了令人兴奋的扩展。我们还讨论了预期的系统性能和 6G 关键性能指标之间的相关权衡。接着, 我们对新兴的 6G 网络架构和技术发展进行了深入的调研。随后, 我们强调了在 6G 测试平台开发方面的最新进展, 并特别关注了系统的关键部分。我们从基础研究、绿色网络及其为支持 6G 愿景而开发的关键技术、6G 试验台开发等方面, 分析了 6G 研究面临的一系列开放性挑战和相应的研究方向。最后, 我们总结了相关的经验教训。总之, 6G 的研究和标准化仍然面临着许多公开的挑战。本文揭示了 6G 所设想的吸引人的特征, 并希望为 6G 研究提供新的动力和灵感。

## 缩写列表

缩写	英文全称	中文释义
1G	the first generation	第一代（移动通信技术）
2D	two-dimensional	二维
2G	the second generation	第二代（移动通信技术）
3D	three-dimensional	三维
3G	the third generation	第三代（移动通信技术）
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
4G	the fourth generation	第四代（移动通信技术）
5G	the fifth generation	第五代（移动通信技术）
5GIA	5G Infrastructure Association	5G 基础设施协会
6G	the sixth generation	第六代（移动通信技术）
6GANA	6G Alliance of Network AI	6G 网络 AI 联盟
6G-IA	6G Smart Networks and Services Industry Association	6G 智能网络与服务行业协会
6GPCM	6G pervasive channel model	6G 普适信道模型
7G	the seventh generation	第七代（移动通信技术）
ADC	analog to digital converter	模数转换器
AI	artificial intelligence	人工智能
AmBC	ambient backscatter communication	环境反向散射通信
AMF	access and mobility management function	接入和移动管理功能
AR	augmented reality	增强现实
ASIC	application specific integrated circuit	专用集成电路
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions	电信行业解决方案联盟
B5G	beyond 5G	后 5G

BCC	blockchain-based collaborative crowdsensing	基于区块链的协作群智感知
BCJR	Bahl, Cocke, Jelinek, and Raviv	后向递归运算算法
BER	bit error rate	误比特率
BP	belief propagation	置信传播算法
B-RAN	blockchain-RAN	区块链无线接入网
CCID	China Center for Information Industry Development	中国电子信息产业发展研究院
CIR	channel impulse response	信道冲激响应
CoMP	coordinated multiple points	协同多点技术
COVID-19	corona virus disease 2019	2019 新型冠状病毒
CPUs	central processing units	中央处理单元
CR	cognitive radio	认知无线电
CS	channel snapshot	信道快拍
CSI	channel state information	信道状态信息
DAC	digital to analog converter	数模转换器
DDoS	distributed denial of service	分布式拒绝服务
DDPG	deep deterministic policy gradient	深度确定策略梯度
DEN2	deep edge node and network	深度边缘节点与网络
DL	deep learning	深度学习
DRL	deep reinforcement learning	深度强化学习
DSP	digital signal processing	数字信号处理
E2E	end-to-end	端到端
ECCs	error-correcting codes	纠错码
EDA	electronic design automation	电子设计自动化
EE	energy efficiency	能量效率
EM	electromagnetic	电磁
eMBB	enhanced mobile broadband	增强型移动宽带

ENI	Experiential Networked Intelligence	体验网络智能
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准化协会
EU	European Union	欧盟
euRLLC	enhanced-uRLLC	增强型高可靠低时延通信
FCC	Federal Communications Commission	联邦通信委员会
FDD	frequency-division duplex	频分双工
feMBB	further-eMBB	进一步增强的移动宽带
FORMAT	Flexible Organization and Reconfiguration of Millimeter-wave Antenna Tiles	毫米波天线网络的灵活组织和重新配置
FSO	free space optical	自由空间光通信
FTN	faster than Nyquist	超奈奎斯特
GBSM	geometry-based stochastic channel model	基于几何的随机信道模型
GDP	gross domestic product	国内生产总值
GRAND	guessing random additive noise decoding	猜测随机加性噪声解码
HD	high definition	高清
HST	high-speed train	高铁
IBFD	in-band full-duplex	带内全双工
ICT	information and communications technology	信息与通信技术
IF	intermediate frequency	中频
IIoT	industrial IoT	工业物联网
IM	index modulation	索引调制
IMT-2020	International Mobile Telecommunications 2020	国际移动通信 2020
IMT-2030	International Mobile Telecommunications 2030	国际移动通信 2030
IoE	internet of everything	万物互联

IoT	internet of things	物联网
IoV	internet of vehicles	车联网
IR	infrared	红外线
ISAC	integrated sensing and communication	通感一体化
ISAC-OW	ISAC with optical wireless	光无线通感一体化
ITU	International Telecommunications Union	国际电信联盟
KPIs	key performance indicators	关键性能指标
KSLD	Kyocera Soraalaser	京瓷 SLD 激光有限公司
LDPC	low density parity check code	低密度奇偶校验
LEO	low-earth-orbit	低轨道（卫星）
LiDAR	light detection and ranging	光感测距技术
LiFi	light fidelity	光保真技术
LRDC	LiFi Research and Development Centre	光保真技术研究与发展中心
LTE	long-term evolution	长期演进计划
MAC	media access control	媒体接入控制
MBRLLC	mobile broadband reliable and low latency communication	移动宽带高可靠低延迟通信
meMBB	massive eMBB	大规模增强型移动宽带
MIMO	multiple-input multiple-output	多输入多输出
MISO	multiple-input single-output	多输入单输出
ML	machine learning	机器学习
mMTC	massive machine type communications	大规模机器类通信
mmWave	millimeter wave	毫米波
MPC	multipath component	多径分量
MR	mixed reality	混合现实
muRLLC	massive uRLLC	大规模高可靠低延时通信

MWCA	Mobile World Congress Americas	世界移动大会-美洲
NFV	network functions virtualization	网络功能虚拟化
NFVI	NFV infrastructure	网络功能虚拟化基础设施
NFV-MANO	NFV management and orchestration	网络功能虚拟化管理和编排
NGMN	Next Generation Mobile Networks	下一代移动网络联盟
NLOS	non-line-of-sight	非视距
NOMA	non-orthogonal multiple access	非正交多址接入
NR	new radio	新空口
NTN	non-terrestrial networks	非陆地网络
NWDAF	network data analysis function	网络数据分析功能
OAM	orbital angular momentum	轨道角动量
OCC	optical camera communications	光学相机通信
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing	正交频分复用
OFDMA	orthogonal frequency division multiple access	正交频分多址接入
OLED	organic light emitting diode	有机发光二极管
O-RAN	open-RAN	开放式无线接入网
OSD	ordered statistics decoding	分阶统计译码
OTFS	orthogonal time frequency space	正交时间频率空间调制
OVXDM	overlapped X domain multiplexing	重叠 X 域复用
OwCs	optical wireless communications	光无线通信
PAC	polarization-adjusted convolutional	分段极化调整卷积码
PAPR	peak to average power ratio	峰均比
PD	photodetector	光电探测器
PDPs	power delay profiles	功率时延分布
PML	Purple Mountain Laboratories	紫金山实验室
QAM	quadrature amplitude modulation	正交幅度调制



QoS	quality of service	服务质量
R&D	research and development	研发
RAN	radio access network	无线接入网
RF	radio frequency	射频
RHS	reconfigurable holographic surface	可重构全息表面
RIS	reconfigurable intelligent surfaces	可重构智能表面
RT	ray tracing	射线追踪
SBA	service-based architecture	基于服务的架构
SC	successive cancellation	连续消除
SDN	software defined network	软件定义网络
SE	spectral efficiency	频谱效率
SEFDM	spectrally efficient frequency domain multiplexing	高频效频域多路复用
SEU	Southeast University	东南大学
SIC	self-interference cancellation	自干扰消除
SMF	session management function	会话管理功能
SNR	signal to noise ratio	信噪比
SON	self-organizing network	自组织网络
SR	symbiotic radio	共生无线电
SSN	self-sustaining network	自维持网络
TCP	transmission control protocol	传输控制协议
TDD	time-division duplex	时分双工
TDMA	time division multiple access	时分多址接入
THz	terahertz	太赫兹
UAV	unmanned aerial vehicle	无人机
UDHN	ultra-dense heterogeneous network	超密集异构网络
UDN	ultra-dense networking	超密集组网
ULA	uniform linear array	均匀线性阵列

umMTC	ultra-mMTC	超大规模机器类通信
UPF	user plane function	用户面功能
uRLLC	ultra-reliable and low latency communications	高可靠低时延通信
UTC	uni-traveling-carrier	单行载流子
UV	ultraviolet	紫外线
V2V	vehicle-to-vehicle	车对车
V2X	vehicle to everything	车联万物
VLC	visible light communications	可见光通信
VLSI	very large scale integration	超大规模集成
VNA	vector network analyzer	矢量网络分析仪
VNFs	virtualized network functions	虚拟化网络功能
VR	virtual reality	虚拟现实
WDM	wavelength division multiplex	波分复用
WiFi	wireless fidelity	无线保真
WLAN	wireless local area network	无线局域网
XR	extended reality	扩展现实

## 参考文献

- [1] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, “An overview of massive MIMO: Benefits and challenges,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, Oct. 2014.
- [2] M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef, “Ultra-dense networks: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 4, pp. 2522–2545, 4th Quart., 2016.
- [3] 384 antenna elements! Huawei’s third generation Massive MIMO continues to lead the way (in Chinese), Accessed date: Aug. 7, 2022. [Online]. Available: <https://www.sohu.com/a/525177315110683>
- [4] 6G Flagship, Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence, White Paper, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://www.mobilewirelesstesting.com/wp-content/uploads/2019/10/5G-evolution-on-the-path-to-6G- wp en 3608-3326-52 v0100.pdf>
- [5] Key R&D projects 2019: Wideband communications and new networks, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://service.most.gov.cn/u/cms/static/201812/12164952skqa.pdf>
- [6] Artificial Intelligence Aided D-band Network for 5G Long Term Evolution, Accessed date: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/871464>
- [7] Key R&D projects 2020: Wideband communications and new networks, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://service.most.gov.cn/u/cms/static/201910/10093904wgzg.pdf>
- [8] Research and Development on Satellite-Terrestrial Integration Technology for Beyond 5G, Accessed date: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www2.nict.go.jp/spacelab/en/pjstit.html>
- [9] Guidelines for the declaration of 2021 projects for the “Multimodal Networks and Communications” key project (in Chinese), Accessed date: Jul. 27, 2022. [Online]. Available: <http://gdstc.gd.gov.cn/attachment/0/422/422266/3296387.pdf>
- [10] 6G SENTINEL — The next generation of mobile communications, Accessed date: Jul. 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.fraunhofer.de/en/research/lighthouse-projects-fraunhofer-initiatives/fraunhofer-lighthouse-projects/6g-sentinel.html>
- [11] Project RISE-6G, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://rise-6g.eu/>
- [12] REINDEER — RESilient INteractive applications through hyper Diversity in Energy Efficient RadioWeaves technology, Accessed date: Jul. 11, 2022. [Online]. Available: <https://reindeer-project.eu/>
- [13] Project Hexa-X, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://hexa-x.eu/>
- [14] RINGS, Accessed date: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/resilient-intelligent-nextg-systems-rings>
- [15] Guidelines for the declaration of 2022 projects for the ‘Multimodal Networks and Communications’ key project (in Chinese), Accessed date: Jul. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.nwu.edu.cn/system/content/download.jsp?urltype=news.DownloadAttachUrl&ow>

[ner=1606286746&wbfileid=6561042](#)

- [16]KT and Hanwha Systems are Jointly Developing 6G Quantum Cryptography Technology, Accessed date: Jul. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.kedglobal.com/cn/6g/newsView/ked202207120033>
- [17]Open6GHub – 6G for Society and Sustainability, Accessed date: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.open6ghub.de/en/#>
- [18]6GStart: Starting the Sustainable 6G SNS Initiative for Europe, Accessed date: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/6gstart/>
- [19]6GTandem: A Dual-frequency Distributed MIMO Approach for Future 6G Applications, Accessed date: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://security-link.se/6gtandem/>
- [20]Hexa-X-II, the Second Phase of the European 6G Flagship Initiative, Accessed date: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://hexa-x.eu/hexa-x-ii-the-second-phase-of-the-european-6g-flagship-initiative/>
- [21]TERA6G, Accessed date: Oct. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.hhi.fraunhofer.de/en/departments/pc/projects/tera6g.html>
- [22]6G White Paper, Accessed date: Apr. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.oulu.fi/6gflagship/6g-white-papers>
- [23]Rohde & Schwarz, 5G Evolution — On the Path To 6G: Expanding the Frontiers of Wireless Communications, White Paper, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://www.mobilewirelesstesting.com/wp-content/uploads/2019/10/5G-evolution-on-the-path-to-6G- wp en 3608-3326-52 v0100.pdf>
- [24]Ericsson, Artificial intelligence in next-generation connected systems, White Paper, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/artificial-intelligence-in-next-generation-connected-systems>
- [25]CCID, 6G Concepts and Vision (in Chinese), White Paper, Mar. 2020. [Online]. Available: <http://www.ccidwise.com/uploads/soft/200311/1-200311133959.pdf>
- [26]CCID, 6G Global Progress and Development Prospects (in Chinese), White Paper, May 2021. [Online]. Available: <https://www.ccidgroup.com/info/1096/33111.htm>
- [27]W. Tong and P. Zhu, 6G, the Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence, 1st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [28]China Mobile, 6G Wireless Endogenous AI Architecture and Technology (in Chinese), White Paper, 2022. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/xh-gau4p5pn3YYaHRephAw>
- [29]China Unicom, 6G White Paper (in Chinese), Mar. 2021. [Online]. Available: <http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN RES/INDUS/2021/3/31/165c9786-7d10-4c98-86a7-3c2b8eb7428d.pdf>
- [30]UNISOC, 6G: Unbounded, with AI (in Chinese), White Paper, Nov. 2020. [Online]. Available: <http://unisocdata.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/other/20201126/202011261130506G%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A6.pdf>
- [31]DATANG Mobile, Global Coverage and Smart Scenario Connections White Paper on 6G Vision

- and Technology Trends (in Chinese), White Paper, Dec. 2020. [Online]. Available: <http://www.future-forum.org/cn/leon/a/upfiles/file/202104/2021040816110207207.pdf>
- [32] IMT-2030 (6G) Promotion Group, White Paper on 6G Overall Vision and Potential Key Technologies, White Paper, June 2021. [Online]. Available: <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202106/P020210604552573543918.pdf>
- [33] IMT-2030 (6G) Promotion Group, 6G Typical scenarios and key capabilities (in Chinese), White Paper, July 2022. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/3KjcE1dIDCbKixNKx3MbEQ>
- [34] NTT DOCOMO INC., 5G Evolution and 6G, White Paper, Jan. 2020. [Online]. Available: [https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper/6g/DOCOMO\\_6G\\_White\\_PaperEN\\_20200124.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper/6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf)
- [35] Samsung Research, 6G The Next Hyper-Connected Experience for All, White Paper, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/6G%20Vision.pdf>
- [36] Next Generation Mobile Networks Alliance, 6G Drivers and vision, April 2021. [Online]. Available: [https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Drivers-and-Vision-V1.0\\_final\\_New.pdf](https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Drivers-and-Vision-V1.0_final_New.pdf)
- [37] The 5G Infrastructure Association, European Vision for the 6G Network Ecosystem, White Paper, June 2021. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2021/06/WhitePaper-6G-Europe.pdf>
- [38] 6G alliance of network AI, From cloud AI to network AI, White Paper, May 2021. [Online]. Available: <https://www.6g-ana.com/upload/file/20210619/6375969458505193666851527.pdf>
- [39] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, “A survey on green 6G network: Architecture and technologies,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175 758–175 768, Dec. 2019.
- [40] L. Zhang, Y.-C. Liang, and D. Niyato, “6G visions: Mobile ultra-broadband, super Internet-of-things, and artificial intelligence,” *China Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1–14, Aug. 2019.
- [41] Z. Zhang *et al.*, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019.
- [42] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, “6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, Sep. 2019.
- [43] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 957–975, Jul. 2020.
- [44] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, “6G wireless systems: A vision, architectural elements, and future directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147 029–147 044, Aug. 2020.
- [45] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, “6G: Opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 126–132, Oct. 2020.
- [46] L. Bariah *et al.*, “A prospective look: Key enabling technologies, applications and open research

- topics in 6G networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174 792–174 820, Aug. 2020.
- [47] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,” *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, May 2020.
- [48] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G era,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, Mar. 2020.
- [49] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G networks: Use cases and technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
- [50] G. Liu *et al.*, “Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030,” *China Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 92–104, Sep. 2020.
- [51] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, Apr. 2020.
- [52] X. You *et al.*, “Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 64, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11432-020-2955-6.
- [53] J. R. Bhat and S. A. Alqahtani, “6G ecosystem: Current status and future perspective,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43 134–43 167, Jan. 2021.
- [54] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, “The road towards 6G: A comprehensive survey,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 334–366, Feb. 2021.
- [55] U. Gustavsson *et al.*, “Implementation challenges and opportunities in beyond-5G and 6G communication,” *IEEE J. Microw.*, vol. 1, no. 1, pp. 86–100, Jan. 2021.
- [56] C. D. Alwis *et al.*, “Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 836–886, Apr. 2021.
- [57] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjolund, and F. Tufvesson, “6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, Jul. 2021.
- [58] D. C. Nguyen *et al.*, “6G Internet of things: A comprehensive survey,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 1, pp. 359–383, Jan. 2022.
- [59] Z. Wang *et al.*, “Vision, application scenarios, and key technology trends for 6G mobile communications,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 65, no. 5, May 2022, doi: 10.1007/s11432-021-3351-5.
- [60] X. Shen, J. Gao, W. Wu, M. Li, C. Zhou, and W. Zhuang, “Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–30, 1st Quart., 2022.
- [61] J. Wu, “Development Paradigms of Cyberspace Endogenous Safety and Security,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 65, no. 5, May, 2022, doi: 10.1007/s11432-021-3379-2.
- [62] O. Kotheli *et al.*, “Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 1, pp. 70 – 109, 1st Quart., 2021.

- [63] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, “A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334 – 2360, 3rd Quart., 2019.
- [64] C. Yu, J. Li, C. Zhang, H. Li, R. He, and B. Lin, “Maritime broadband communications: Applications, challenges and an offshore 5G-virtual MIMO paradigm,” in *Proc. IEEE ISPA/BDCloud/SocialCom/SustainCom20*, Exeter, United Kingdom, Dec. 2020, pp. 1286 – 1291.
- [65] M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine, and J. Ben-Othman, “Underwater wireless sensor networks: A survey on enabling technologies, localization protocols, and Internet of underwater things,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96 879 – 96 899, Jul. 2019.
- [66] N. Saeed, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, “Toward the Internet of underground things: A systematic survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3443 – 3466, 4th Quart., 2019.
- [67] K. Liolis *et al.*, “Use cases and scenarios of 5G integrated satelliteterrestrial networks for enhanced mobile broadband: The sat5G approach,” *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 37, no. 2, pp. 91 – 112, Mar. 2019.
- [68] ITU-R, Key elements for integrating of satellite systems into next generation access technologies, July 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2460-2019>
- [69] 3GPP TR 38.811, V15.4.0, Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15), Sep. 2020. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3234>
- [70] 3GPP TR 38.821, V16.1.0, Solutions for NR to support nonterrestrial networks (NTN) (Release 16), May 2021. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525>
- [71] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, “Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks— with a focus on propagation models,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 65, no. 12, pp. 6213 – 6230, Dec. 2017.
- [72] K. Tekbıyık, A. R. Ekti, G. K. Kurt, and A. Gorc, in, “Terahertz band ” communication systems: Challenges, novelties and standardization efforts,” *Phys. Commun.*, vol. 35, p. 100700, Aug. 2019.
- [73] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. T. Hossan, and Y. M. Jang, “Optical wireless hybrid networks: Trends, opportunities, challenges, and research directions,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 2, pp. 930 – 966, 2nd Quart., 2020.

- [74] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, and Y. Hao, “6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 22 – 32, Dec. 2020.
- [75] S. Ahearne *et al.*, “Integrating THz wireless communication links in a data centre network,” in *Proc. 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, Dresden, Germany, Sep. 2019, pp. 393 – 398.
- [76] I. Akyildiz and J. Jornet, “The Internet of nano-things,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp. 58 – 63, Dec. 2010.
- [77] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, “Emerging optical wireless communications—advances and challenges,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 9, pp. 1738 – 1749, Sep. 2015.
- [78] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, “A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819 – 9840, Jan. 2018.
- [79] V. Petrov, T. Kurner, and I. Hosako, “IEEE 802.15.3d: First standardization efforts for sub-terahertz band communications toward 6G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, pp. 28 – 33, Nov. 2020.
- [80] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11, 1999. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8684613>
- [81] IEEE 802.15.7r1 OWC TG (TG7r1), Current Status of IEEE 802.15.7 r1 OWC Standardization. Accessed: May 6, 2022. [Online]. Available: [http://j-photonics.org/vlca/wp-content/uploads/2018/04/2015\\_10\\_26\\_YeongMinJangICEVLC2015CC.pdf](http://j-photonics.org/vlca/wp-content/uploads/2018/04/2015_10_26_YeongMinJangICEVLC2015CC.pdf)
- [82] IEEE 802.15 WPAN task group 13 (TG13) multi-gigabit/s optical wireless communications, Accessed: Oct. 7, 2021. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG13.html>
- [83] Status of IEEE 802.11 light communication TG, Accessed: Sep. 25, 2021. [Online]. Available: [https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb\\_u\\_pdate.htm](https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbb_u_pdate.htm)
- [84] N. C. Luong *et al.*, “Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3133 – 3174, 4th Quart., 2019.
- [85] Y. Cui, F. Liu, X. Jing, and J. Mu, “Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges,” *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 5, pp. 158 – 167, Sep. 2021.
- [86] F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths, and L. Hanzo, “Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, Jun. 2020.
- [87] C. B. Barneto, S. D. Liyanaarachchi, M. Heino, T. Riihonen, and M. Valkama, “Full duplex radio/radar technology: The enabler for advanced joint communication and sensing,” *IEEE*



*Wireless Commun.*, vol. 28, no. 1, pp. 82–88, Feb. 2021.

- [88] 3GPP TR 23.791, V16.2.0, Study of Enablers for Network Automation for 5G (Release 16), June 2019. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3252>
- [89] R. Shafin, L. Liu, V. Chandrasekhar, H. Chen, J. Reed, and J. C. Zhang, “Artificial intelligence-enabled cellular networks: A critical path to beyond-5G and 6G,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 212–217, Apr. 2020.
- [90] Operator Defined Open and Intelligent Radio Access Networks, Accessed: Oct. 7, 2021. [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/>
- [91] O. Holland et al., “The IEEE 1918.1 “tactile Internet” standards working group and its standards,” *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 256–279, Feb. 2019.
- [92] G. Kolovou, S. Oteafy, and P. Chatzimisios, “A remote surgery use case for the IEEE p1918.1 tactile Internet standard,” in *Proc. IEEE ICC’21*, Montreal, QC, Canada, Jun. 2021, pp. 1–6.
- [93] Snapdragon XR2 5G Platform, Accessed: Oct. 8, 2021. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-xr2-5g-platform>
- [94] Tactile Internet, IEEE Standard 1918.1, Standards Working Group, Jul. 2016. Accessed: Oct. 10, 2021. [Online]. Available: <https://grouper.ieee.org/groups/1918/1/index.html>
- [95] S. Ivanov, K. Nikolskaya, G. Radchenko, L. Sokolinsky, and M. Zymbler, “Digital twin of city: Concept overview,” in *Proc. 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, Chelyabinsk, Russia, Nov. 2020, pp. 178–186.
- [96] China Electronic Technology Standardization Institute, White Paper on the Digital Twins Applications (in Chinese), White Paper, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3 AP202011231431940763 1.pdf?1606214310000.pdf>
- [97] Azure digital twins: Use IoT spatial intelligence to create models of physical environments, Accessed: Oct. 8, 2021. [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/#overview>
- [98] Digital twins: Simulation at Siemens, Accessed: Oct. 8, 2021. [Online]. Available: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/digitaltwin/digital-twin.html>
- [99] V.-L. Nguyen, P.-C. Lin, B.-C. Cheng, R.-H. Hwang, and Y.-D. Lin, “Security and privacy for 6G: A survey on prospective technologies and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 4, pp. 2384–2428, 4th Quart., 2021.
- [100] W. Zhang, D.-S. Ding, Y.-B. Sheng, L. Zhou, B.-S. Shi, and G.-C. Guo, “Quantum secure direct communication with quantum memory,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, no. 22, p. 220501, May 2017.
- [101] A. Dorri, M. Steger, S. S. Kanhere, and R. Jurdak, “Blockchain: A distributed solution to automotive security and privacy,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 12, pp. 119–125, Dec. 2017.
- [102] Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylianttila, “AI and 6G security:

- Opportunities and challenges,” in *Proc. 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Porto, Portugal, Jun. 2021, pp. 616–621.
- [103] M. A. Al-Garadi, A. Mohamed, A. K. Al-Ali, X. Du, I. Ali, and M. Guizani, “A survey of machine and deep learning methods for Internet of things (IoT) security,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 3, pp. 1646–1685, 3rd Quart., 2020.
- [104] 3GPP TR 33.813, V16.0.0, Study on security aspects of network slicing enhancement (Release 16), July 2020. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3541>
- [105] 3GPP TS 33.501, V17.3.0, Security architecture and procedures for 5G system (Release 17), Sep. 2021. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3169>
- [106] P. Porambage, G. Gur, D. P. M. Osorio, M. Liyanage, A. Gurtov, and M. Ylianttila, “The roadmap to 6G security and privacy,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1094–1122, May 2021.
- [107] ITU-R, IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://www.itu.int/dms/pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf>
- [108] VIVO, White Paper on 6G Vision, Requirement and Challenges (in Chinese), White Paper, Oct. 2020. [Online]. Available: <http://www.vivo.com.cn/6g/CH/vivo6gvision.pdf>
- [109] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, “6G and beyond: The future of wireless communications systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133 995–134 030, Jul. 2020.
- [110] A. Nasrallah et al., “Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF detnet standards and related 5G ULL research,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 88–145, 1st Quart., 2019.
- [111] W. Wu, “Survey on the development of space-integrated-ground information network (in Chinese),” *Space-integrated-Ground Information Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 1–16, Sep. 2020.
- [112] M. Zhong, Y. Yang, H. Yao, X. Fu, O. A. Dobre, and O. Postolache, “5g and IoT: Towards a new era of communications and measurements,” *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 22, no. 6, pp. 18–26, Dec. 2019.
- [113] C. B. Barneto et al., “High-accuracy radio sensing in 5G new radio networks: Prospects and self-interference challenge,” in *Proc. 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2019, pp. 1159–1163.
- [114] Future Network White Paper – Deterministic Network Technology System White Paper (2021 ed., in Chinese), June 2019. [Online]. Available: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/news/future-network-whitepaper.pdf?la=zh>
- [115] I. Ku, C.-X. Wang, and J. Thompson, “Spectral, energy and economic efficiency of relay-aided cellular networks,” *IET Commun.*, vol. 7, no. 14, pp. 1476–1486, Sep. 2013.
- [116] P. Patcharamaneepakorn et al., “Spectral, energy, and economic efficiency of 5G multicell

- massive MIMO systems with generalized spatial modulation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 12, pp. 9715–9731, Feb. 2016.
- [117] R. Zhang, Y. Li, C.-X. Wang, Y. Ruan, Y. Fu, and H. Zhang, “Energy-spectral efficiency trade-off in underlaying mobile D2D communications: An economic efficiency perspective,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 7, pp. 4288–4301, Jul. 2018.
- [118] IMT-2020(5G) – Visions and Requirements for 5G (in Chinese), May 2014. [Online]. Available: <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201804/P020151211378934236163.pdf>
- [119] R. Zi, X. Ge, J. Thompson, C.-X. Wang, H. Wang, and T. Han, “Energy efficiency optimization of 5g radio frequency chain systems,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 758–771, Apr. 2016.
- [120] Next Generation Mobile Networks Alliance, 6G Use Cases and Analysis, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Use-Cases-and-Analysis.pdf>
- [121] Next G Alliance Report: 6G Applications and Use Case, June 2022.[Online]. Available: <https://www.nextgalliance.org/white-papers/6g-applications-and-use-cases/>
- [122] 6G Infrastructure Association, What societal values will 6G address? Societal Key Values and Key Value Indicators analysed through 6G use cases, May 2022. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2022/05/What-societal-values-will-6G-address-White-Paper-v1.0-final.pdf>
- [123] Z. Chen et al., “A survey on terahertz communications,” *China Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–35, Feb. 2019.
- [124] S. Haddadin, L. Johannsmeier, and F. Diaz Ledezma, “Tactile robots as a central embodiment of the tactile Internet,” *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 471–487, Feb. 2019.
- [125] G. Szabo, S. Racz, N. Reider, H. A. Munz, and J. Peto, “Digital twin: Network provisioning of mission critical communication in cyber physical production systems,” in *Proc. 2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, BALI, Indonesia, Jul. 2019, pp. 37–43.
- [126] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, and D. Fogli, “A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167 653–167 671, Nov. 2019.
- [127] M. Vukovic, D. Mazzei, S. Chessa, and G. Fantoni, “Digital twins in industrial IoT: A survey of the state of the art and of relevant standards,” in *Proc. IEEE ICC workshops ’21*, Montreal, QC, Canada, Jun. 2021, pp. 1–6.
- [128] A. K. Tripathy, S. Chinara, and M. Sarkar, “An application of wireless brain–computer interface for drowsiness detection,” *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 276–284, 2016.
- [129] S. R. A. Jafri et al., “Wireless brain computer interface for smart home and medical system,” *Wireless Pers. Commun.*, vol. 106, no. 4, pp. 2163–2177, Jun. 2019.
- [130] J. D. Simeral et al., “Home use of a percutaneous wireless intracortical brain–computer interface by individuals with tetraplegia,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 68, no. 7, pp. 2313–2325, Jul. 2021.

- [131] X. Liu et al., “A fully integrated sensor-brain–machine interface system for restoring somatosensation,” *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 4, pp. 4764–4775, Feb. 2021.
- [132] S. J. H. Pirzada, M. Haris, M. N. Hasan, T. Xu, and L. Jianwei, “Detection and communication of disasters with space-air-ground integrated network,” in *Proc. 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, Bahawalpur, Pakistan, Nov. 2020, pp. 1–6.
- [133] W. Jin, J. Yang, Y. Fang, and W. Feng, “Research on application and deployment of UAV in emergency response,” in *Proc. 2020 IEEE 10th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, Jul. 2020, pp. 277–280.
- [134] W. Feng et al., “NOMA-based UAV-aided networks for emergency communications,” *China Commun.*, vol. 17, no. 11, pp. 54–66, Nov. 2020.
- [135] M.-S. Shin, J.-G. Ryu, and D.-G. Oh, “On the mixed support of TDMA and SCPC for satellite disaster communications network,” in *Proc. 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Oct. 2017, pp. 1213–1215.
- [136] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G. Y. Li, “Fundamental trade-offs on green wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 30–37, Jun. 2011.
- [137] X. Yu, G. Li, and W. Lu, “Power consumption based on 5G communication,” in *Proc. 2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, Xi’an, China, Oct. 2021, pp. 910–914.
- [138] M. Rasti, S. K. Taskou, H. Tabassum, and E. Hossain, “Evolution toward 6G multi-band wireless networks: A resource management perspective,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 4, pp. 118–125, Aug. 2022.
- [139] Y. Wu et al., “Green transmission technologies for balancing the energy efficiency and spectrum efficiency trade-off,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 11, pp. 112–120, Nov. 2014.
- [140] I. Ku, C.-X. Wang, and J. Thompson, “Spectral-energy efficiency tradeoff in relay-aided cellular networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 4970–4982, Oct. 2013.
- [141] R. Zhang, Y. Li, C.-X. Wang, Y. Ruan, and H. Zhang, “Performance tradeoff in relay aided d2d-cellular networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 10, pp. 10 144–10 149, Oct. 2018.
- [142] L. You, J. Xiong, D. W. K. Ng, C. Yuen, W. Wang, and X. Gao, “Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in RIS-aided multiuser MIMO uplink transmission,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 1407–1421, 2021.
- [143] Y. Ruan, Y. Li, C.-X. Wang, R. Zhang, and H. Zhang, “Power allocation in cognitive satellite-vehicular networks from energy-spectral efficiency tradeoff perspective,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 318–329, Jun. 2019.
- [144] X. Wei, H. Al-Obiedollah, K. Cumanan, W. Wang, Z. Ding, and O. A. Dobre, “Spectral-energy efficiency trade-off based design for hybrid TDMA-NOMA system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 3, pp. 3377–3382, Mar. 2022.
- [145] M. K. Mishra and A. Trivedi, “Spectral efficiency and deployment cost efficiency analysis of mmW/UHF-based cellular network,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 7, pp. 6565–6577, Jul. 2019.

- [146] P. Patcharamaneepakorn et al., “Quadrature space-frequency index modulation for energy-efficient 5g wireless communication systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 7, pp. 3050–3064, Jul. 2018.
- [147] Y. Ruan, Y. Li, C.-X. Wang, and R. Zhang, “Energy efficient adaptive transmissions in integrated satellite-terrestrial networks with ser constraints,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 210–222, Jan. 2018.
- [148] L. Chen, C. Liu, X. Hong, C.-X. Wang, J. Thompson, and J. Shi, “Capacity and delay tradeoff of secondary cellular networks with spectrum aggregation,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp. 3974–3987, Jun. 2018.
- [149] Z. Wei, Z. Feng, H. Zhou, L. Wang, and H. Wu, “Capacity and delay of unmanned aerial vehicle networks with mobility,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 1640–1653, Apr. 2019.
- [150] Y. Luo, M. Zeng, and H. Jiang, “Learning to tradeoff between energy efficiency and delay in energy harvesting-powered D2D communication: A distributed experience-sharing algorithm,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5585–5594, Jun. 2019.
- [151] T. Yang, L. Kong, N. Zhao, and R. Sun, “Efficient energy and delay tradeoff for vessel communications in SDN based maritime wireless networks,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 22, no. 6, pp. 3800–3812, Jun. 2021.
- [152] Z. Cao et al., “Security-reliability trade-off analysis of AN-aided relay selection for full-duplex relay networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 3, pp. 2362–2377, Mar. 2021.
- [153] X. Zeng, K. Liu, J. Ma, M. Chen, and M. Yu, “Reliability and delay trade-off analysis of unslotted IEEE 802.15.4 sensor network for shipboard environment,” *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 2, pp. 2400–2411, Jan. 2021.
- [154] Q. Chen, X. J. Zhang, W. L. Lim, Y. S. Kwok, and S. Sun, “High reliability, low latency and cost effective network planning for industrial wireless mesh networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 27, no. 6, pp. 2354–2362, Dec. 2019.
- [155] H. Song, X. Fang, and C.-X. Wang, “Cost-reliability tradeoff in licensed and unlicensed spectra interoperable networks with guaranteed user data rate requirements,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 35, no. 1, pp. 200–214, Nov. 2017.
- [156] X. Zhang, J. Wang, and H. V. Poor, “Statistical delay and error rate bounded QoS provisioning for mURLLC over 6G CF M-MIMO mobile networks in the finite blocklength regime,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 39, no. 3, pp. 652–667, Mar. 2021.
- [157] H. Wu et al., “Resource management in space-air-ground integrated vehicular networks: SDN control and AI algorithm design,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 6, pp. 52–60, Dec. 2020.
- [158] W. Tarneberg, M. Karaca, A. Robertsson, F. Tufvesson, and M. Kihl, “Utilizing massive MIMO for the tactile internet: Advantages and trade-offs,” in *Proc. 2017 IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops)*, San Diego, CA, USA, Jun. 2017, pp. 1–6.
- [159] X. Lu, I. H. Kim, A. Xhafa, J. Zhou, and K. Tsai, “Reaching 10- Years of battery life for

- industrial IoT wireless sensor networks,” in *Proc. 2017 Symposium on VLSI Circuits*, Kyoto, Japan, Jun. 2017, pp. C66–C67.
- [160] Powering the Industrial Internet of Things (IIoT), Accessed date: Nov. 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.saftbatteries.com/energizing-iiot/powering-industrial-internet-things-iiot>
- [161] C. Wang, P. Zhang, N. Kumar, L. Liu, and T. Yang, “GCWCN: 6G based global coverage wireless communication network architecture,” *IEEE Netw.*, pp. 1–7, early access, doi: 10.1109/MNET.123.2200094, 2022.
- [162] J. M. C. Brito, L. L. Mendes, and J. G. S. Gontijo, “Brazil 6G Project - An Approach to Build a National-wise Framework for 6G Networks,” in *Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. Levi, Finland: IEEE, Mar. 2020, pp. 1–5.
- [163] Y. Zhu, X. Tian, K. Chi, C. Wen, and Y.-h. Zhu, “Real-time power control of wireless chargers in battery-free body area networks,” in *Proc. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA, Dec. 2019, pp. 1–6.
- [164] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee, “Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 90–97, Feb. 2015.
- [165] M. Pattaranantakul, R. He, Q. Song, Z. Zhang, and A. Meddahi, “NFV security survey: From use case driven threat analysis to state-of-the-art countermeasures,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3330–3368, 4th Quart., 2018.
- [166] A. U. Rehman, R. L. Aguiar, and J. P. Barraca, “Network functions virtualization: The long road to commercial deployments,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60 439–60 464, May 2019.
- [167] B. Yi, X. Wang, K. Li, S. k. Das, and M. Huang, “A comprehensive survey of network function virtualization,” *Comput. Networks*, vol. 133, pp. 212–262, Mar. 2018.
- [168] L. Linguaglossa et al., “Survey of performance acceleration techniques for network function virtualization,” *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 4, pp. 746–764, Apr. 2019.
- [169] C.-J. Lin, Y. Luo, L.-M. Wang, and L.-D. Chen, “Flow scheduling in a heterogeneous NFV environment using reinforcement learning,” in *Proc. 2021 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS)*, Riverside, CA, USA, Oct. 2021, pp. 1–8.
- [170] S. Kianpisheh and R. H. Glitho, “Joint admission control and resource allocation with parallel VNF processing for time-constrained chains of virtual network functions,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 162 553–162 571, Nov. 2021.
- [171] P. Xue and Z. Jiang, “SecRouting: Secure routing for network functions virtualization (NFV) technology,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 69, no. 3, pp. 1727–1731, Mar. 2022.
- [172] D. Breitgand, V. Eisenberg, N. Naaman, N. Rozenbaum, and A. Weit, “Toward true cloud native NFV MANO,” in *Proc. 2021 12th International Conference on Network of the Future (NoF)*, Coimbra, Portugal, Oct. 2021, pp. 1–5.
- [173] M. S. Rahman, I. Khalil, and M. Atiquzzaman, “Blockchain-enabled SLA compliance for crowdsourced edge-based network function virtualization,” *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 5, pp. 58–65, Sep. 2021.

- [174] P. Valsamas, L. Mamatas, and L. M. Contreras, “A comparative evaluation of edge cloud virtualization technologies,” *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, vol. 19, no. 2, pp. 1351–1365, Jun. 2022.
- [175] T. Das, V. Sridharan, and M. Gurusamy, “A survey on controller placement in SDN,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 472–503, 1st Quart., 2020.
- [176] M. B. Jimenez, D. Fernandez, J. E. Rivadeneira, L. Bellido, and A. Cardenas, “A survey of the main security issues and solutions for the SDN architecture,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 122 016–122 038, Sep. 2021.
- [177] D. B. Rawat, “Fusion of software defined networking, edge computing, and blockchain technology for wireless network virtualization,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 10, pp. 50–55, Oct. 2019.
- [178] R. Alvizu et al., “Comprehensive survey on T-SDN: Software-defined networking for transport networks,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2232–2283, 4th Quart., 2017.
- [179] M. H. Rehmani, A. Davy, B. Jennings, and C. Assi, “Software defined networks-based smart grid communication: A comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2637–2670, 3rd Quart., 2019.
- [180] H. Luo, K. Wu, R. Ruby, Y. Liang, Z. Guo, and L. M. Ni, “Software defined architectures and technologies for underwater wireless sensor networks: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2855–2888, 4th Quart., 2018.
- [181] Z. Tu, H. Zhou, K. Li, M. Li, and A. Tian, “An energy-efficient topology design and DDoS attacks mitigation for green software defined satellite network,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 211 434–211 450, Nov. 2020.
- [182] K. Gao, C. Xu, P. Zhang, J. Qin, L. Zhong, and G.-M. Muntean, “GCHMV: Game-enhanced compensation handover scheme for multipath tcp in 6G software defined vehicular networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 12, pp. 16 142–16 154, Dec. 2020.
- [183] Z. Zhang, L. Ma, K. K. Leung, and F. Le, “More is not always better: An analytical study of controller synchronizations in distributed SDN,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 29, no. 4, pp. 1580–1590, Aug. 2021.
- [184] J. Xie et al., “A survey of machine learning techniques applied to software defined networking (SDN): Research issues and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 393–430, 1st Quart., 2019.
- [185] The STRIDE Threat Model: Microsoft Docs, Accessed: May 6, 2022. [Online]. Available: [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878\(v=cs.20\)?redirectedfrom=MSDN](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/commerce-server/ee823878(v=cs.20)?redirectedfrom=MSDN)
- [186] M. W. Hussain, K. H. K. Reddy, J. J. P. C. Rodrigues, and D. S. Roy, “An indirect controller-legacy switch forwarding scheme for link discovery in hybrid SDN,” *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 3142–3149, Jun. 2021.
- [187] G. Manogaran, T. Baabdullah, D. B. Rawat, and P. M. Shakeel, “AI assisted service virtualization and flow management framework for 6G-enabled cloud-software-defined network based IoT,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 16, pp. 14 644–14 654, Aug. 2022.

- [188] K. Gao et al., “Freshness-aware age optimization for multipath tcp over software defined networks,” *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, early access, doi: 10.1109/TNSE.2021.3075704, 2022.
- [189] 3GPP TS 29.500, 5G System; Technical Realization of Service Based Architecture; Stage 3, v1.0.0, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3338>
- [190] G. Brown, Serviced-based architecture for 5G core network. White Paper. Huawei Technology Co. Ltd. 2017. [Online]. Available: <https://www.3g4g.co.uk/5G/5Gtech/6004/2017/11/Service-Based-Architecture-for-5G-Core-Networks-HR-Huawei.pdf>
- [191] T.-X. Do and Y. Kim, “Usage-aware protection plan for state management functions in service-based 5G core network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 36 906–36 915, Jul. 2018.
- [192] Q. Yu et al., “A fully-decoupled RAN architecture for 6G inspired by neurotransmission,” *J. Commun. Inf. Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 111–117, Dec. 2019.
- [193] H. C. Rudolph, A. Kunz, L. L. Iacono, and H. V. Nguyen, “Security challenges of the 3GPP 5G service based architecture,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 60–65, Mar. 2019.
- [194] T. V. Kiran Buyakar, H. Agarwal, B. R. Tamma, and A. A. Franklin, “Prototyping and load balancing the service based architecture of 5G core using NFV,” in *Proc. 2019 IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, Paris, France, Jun. 2019, pp. 228–232.
- [195] E. Zeydan, J. Manges-Bafalluy, J. Baranda, M. Requena, and Y. Turk, “Service based virtual RAN architecture for next generation cellular systems,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9455–9470, Jan. 2022.
- [196] X. Wang et al., “Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-advanced and beyond,” *China Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 14–28, Jan. 2022.
- [197] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network slicing in 5G: Survey and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017.
- [198] L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han, and C. S. Hong, “Network slicing: Recent advances, taxonomy, requirements, and open research challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36 009–36 028, Feb. 2020.
- [199] F. Debbabi, R. Jmal, L. C. Fourati, and A. Ksentini, “Algorithmics and modeling aspects of network slicing in 5G and beyonds network: Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 162 748–162 762, Sep. 2020.
- [200] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, “Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, 3rd Quart., 2018.
- [201] A. Kaloxylos, “A survey and an analysis of network slicing in 5G networks,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 60–65, Mar. 2018.
- [202] Dogra, R. K. Jha, and S. Jain, “A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and emerging technologies,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67 512–67 547, Oct. 2020.



- [203] A. Khan, M. Abolhasan, W. Ni, J. Lipman, and A. Jamalipour, "An end-to-end (E2E) network slicing framework for 5G vehicular ad-hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 7103–7112, Jul. 2021.
- [204] X. Li, R. Ni, J. Chen, Y. Lyu, Z. Rong, and R. Du, "End-to-end network slicing in radio access network, transport network and core network domains," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 29 525–29 537, Feb. 2020.
- [205] H. Cao et al., "Toward tailored resource allocation of slices in 6G networks with softwarization and virtualization," *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 9, pp. 6623–6637, May 2022.
- [206] W. Shi et al., "Two-level soft RAN slicing for customized services in 5G-and-beyond wireless communications," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 18, no. 6, pp. 4169–4179, Jun. 2022.
- [207] X. Shen et al., "AI-assisted network-slicing based next-generation wireless networks," *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 1, pp. 45–66, Jan. 2020.
- [208] H. Wang, Y. Wu, G. Min, and W. Miao, "A graph neural networkbased digital twin for network slicing management," *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 18, no. 2, pp. 1367–1376, Feb. 2022.
- [209] J. Mei, X. Wang, K. Zheng, G. Boudreau, A. B. Sediq, and H. AbouZeid, "Intelligent radio access network slicing for service provisioning in 6G: A hierarchical deep reinforcement learning approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 9, pp. 6063–6078, Sep. 2021.
- [210] A. Nassar and Y. Yilmaz, "Deep reinforcement learning for adaptive network slicing in 5G for intelligent vehicular systems and smart cities," *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 1, pp. 222–235, Jan. 2022.
- [211] K. Suh, S. Kim, Y. Ahn, S. Kim, H. Ju, and B. Shim, "Deep reinforcement learning-based network slicing for beyond 5G," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 7384–7395, Jan. 2022.
- [212] N. Reyhanian and Z.-Q. Luo, "Data-driven adaptive network slicing for multi-tenant networks," *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 16, no. 1, pp. 113–128, Jan. 2022.
- [213] H. Guo, J. Li, J. Liu, N. Tian, and N. Kato, "A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 53–87, 1st Quart., 2022.
- [214] L. Zhao, N. Kumar, C. Wu, J. Hu, and A. Al-Dubai, "Guest editorial: Introduction to the special section on intelligence-empowered collaboration among space, air, ground, and sea mobile networks towards B5G," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 2719–2721, Oct. 2021.
- [215] Y. Pang, D. Wang, D. Wang, L. Guan, C. Zhang, and M. Zhang, "A space-air-ground integrated network assisted maritime communication network based on mobile edge computing," in *Proc. 2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES)*, Beijing, China, Oct. 2020, pp. 269–274.
- [216] Mao, F. Tang, Y. Kawamoto, and N. Kato, "Optimizing computation offloading in satellite-UAV-served 6G IoT: A deep learning approach," *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 4, pp. 102–108, Jul. 2021.
- [217] N. Kato et al., "Optimizing space-air-ground integrated networks by artificial intelligence," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 140–147, Aug. 2019.
- [218] M. A. Adedoyin and O. E. Falowo, "Combination of ultra-dense networks and other 5G enabling technologies: A survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 22 893–22 932, Jan. 2020.

- [219] Y. Jo, H. Kim, J. Lim, and D. Hong, "Self-optimization of coverage and system throughput in 5G heterogeneous ultra-dense networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 285–288, Mar. 2020.
- [220] I. A. Alablani and M. A. Arafah, "An adaptive cell selection scheme for 5G heterogeneous ultra-dense networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64 224–64 240, Apr. 2021.
- [221] W. Sun, L. Wang, J. Liu, N. Kato, and Y. Zhang, "Movement aware comp handover in heterogeneous ultra-dense networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 1, pp. 340–352, Jan. 2021.
- [222] S. K. Sharma and X. Wang, "Toward massive machine type communications in ultra-dense cellular IoT networks: Current issues and machine learning-assisted solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 426–471, 1st Quart., 2020.
- [223] B. Zhang, S. Liu, J.-L. Yu, and Z. Han, "A learning aided long-term user association scheme for ultra-dense networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 1, pp. 820–830, Jan. 2022.
- [224] S. Kim, J. Son, and B. Shim, "Energy-efficient ultra-dense network using LSTM-based deep neural networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 7, pp. 4702–4715, Jul. 2021.
- [225] W. Li, Z. Su, R. Li, K. Zhang, and Y. Wang, "Blockchain-based data security for artificial intelligence applications in 6G networks," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 6, pp. 31–37, Nov. 2020.
- [226] V. S. R. Manoharan, S. Ramachandran, and V. Rajasekar, "Blockchain based privacy preserving framework for emerging 6G wireless communications," *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 18, no. 7, pp. 4868–4874, Jul. 2022.
- [227] J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, and H. Arslan, "Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1773–1828, 2nd Quart., 2019.
- [228] H. A. Al-Mohammed and E. Yaacoub, "On the use of quantum communications for securing IoT devices in the 6G era," in *Proc. IEEE ICC wkshps '21*, Montreal, QC, Canada, Jun. 2021, pp. 1–6.
- [229] The inherent security of Open RAN, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://www.fiercewireless.com/sponsored/inherent-security-open-ran>
- [230] L. Jin et al., "Introduction to wireless endogenous security and safety: Problems, attributes, structures and functions," *China Commun.*, vol. 18, no. 9, pp. 88–99, Sep. 2021.
- [231] X. Wang, L. Jin, Y. Lou, and X. Xu, "Analysis and application of endogenous wireless security principle for key generation," *China Commun.*, vol. 18, no. 4, pp. 99–114, Apr. 2021.
- [232] C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R. H. Glitho, M. J. Morrow, and P. A. Polakos, "A comprehensive survey on fog computing: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 416–464, 1st Quart., 2018.
- [233] S. Ghosh, A. Mukherjee, S. K. Ghosh, and R. Buyya, "Mobi-IoST: Mobility-aware cloud-fog-edge-IoT collaborative framework for timecritical applications," *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 2271–2285, Oct. 2020.
- [234] China Mobile: White Paper on Computing Force Network (in Chinese), Nov. 2021. [Online]. Available: <http://www.econsortium.org/Uploads/file/20211108/1636352251472904.pdf>

- [235] China Unicom: White Paper on Computing Force Network (in Chinese), Nov. 2019. [Online]. Available: [http://www.bomeimedia.com/China-unicom/white paper/20191101-06.pdf](http://www.bomeimedia.com/China-unicom/white%20paper/20191101-06.pdf)
- [236] N. Refat, M. A. Rahman, A. T. Asyhari, H. Kassim, I. F. Kurniawan, and M. Rahman, "Matt: A mobile assisted tense tool for flexible m-grammar learning based on cloud-fog-edge collaborative networking," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 66 074–66 084, Apr. 2020.
- [237] R. Fantacci and B. Picano, "Performance analysis of a delay constrained data offloading scheme in an integrated cloud-fog-edge computing system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 10, pp. 12 004–12 014, Oct. 2020.
- [238] X. Han, Y. Zhao, K. Yu, X. Huang, K. Xie, and H. Wei, "Utility-optimized resource allocation in computing-aware networks," in *Proc. ICCSN'21*, Chongqing, China, Jun. 2021, pp. 199–205.
- [239] A. Alnoman and A. Anpalagan, "Computing-aware base station sleeping mechanism in H-CRAN-Cloud-Edge networks," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 958–967, Jul. 2021.
- [240] ITU-T. Draft Recommendation ITU-T Y.2501 (formerly Y.CPN-arch): Computing Power Network – framework and architecture, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2501-202109-I>
- [241] Frontier Report on the Integrated Network of Communication, Sensing, and Computing, China Institute of Communications, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://www.chinacic.cn/upload/202202/24/b9f23a4c8b1640babd34a7526beadbc5.pdf>
- [242] S. Yan, M.-G. Peng, and W.-B. Wang, "Integration of communication, sensing and computing (in Chinese)," *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, vol. 44, no. 4, pp. 1–11, Aug. 2021.
- [243] Z. Feng, Z. Wei, X. Chen, H. Yang, Q. Zhang, and P. Zhang, "Joint communication, sensing, and computation enabled 6G intelligent machine system," *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 6, pp. 34–42, Nov. 2021.
- [244] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, Mar. 2017.
- [245] O. T. Demir, E. Björnson, and L. Sanguinetti, "Foundations of user-centric cell-free massive MIMO," *FNT in Signal Processing*, vol. 14, no. 3-4, pp. 162–472, Aug. 2021.
- [246] A. Papazafeiropoulos, P. Kourtessis, M. D. Renzo, S. Chatzinotas, and J. M. Senior, "Performance analysis of cell-free massive MIMO systems: A stochastic geometry approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 4, pp. 3523–3537, Apr. 2020.
- [247] A. Papazafeiropoulos, E. Björnson, P. Kourtessis, S. Chatzinotas, and J. M. Senior, "Scalable cell-free massive MIMO systems: Impact of hardware impairments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 10, pp. 9701–9715, Oct. 2021.
- [248] Y. Zhang, Q. Zhang, H. Hu, L. Yang, and H. Zhu, "Cell-free massive MIMO systems with non-ideal hardware: Phase drifts and distortion noise," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 11, pp. 11 604–11 618, Nov. 2021.

- [249] M. Makhanbet, T. Lv, W. Ni, and M. Orynbet, “Energy-delay-aware power control for reliable transmission of dynamic cell-free massive MIMO,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, no. 1, pp. 276–290, Jan. 2022.
- [250] F. Ye, J. Li, P. Zhu, D. Wang, and X. You, “Fingerprint-based covariance matrix estimation for cell-free distributed massive MIMO systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 416–420, Feb. 2022.
- [251] S. Datta, D. N. Amudala, E. Sharma, R. Budhiraja, and S. S. Panwar, “Full-duplex cell-free massive MIMO systems: Analysis and decentralized optimization,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 31–50, Dec. 2021.
- [252] T. T. Vu, D. T. Ngo, N. H. Tran, H. Q. Ngo, M. N. Dao, and R. H. Middleton, “Cell-free massive MIMO for wireless federated learning,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 10, pp. 6377–6392, Oct. 2020.
- [253] J. Wang, B. Wang, J. Fang, and H. Li, “Millimeter wave cell-free massive MIMO systems: Joint beamforming and AP-user association,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 298–302, Feb. 2022.
- [254] M. Alonzo, P. Baracca, S. R. Khosravirad, and S. Buzzi, “Cell-free and user-centric massive MIMO architectures for reliable communications in indoor factory environments,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1390–1404, Jun. 2021.
- [255] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau, and K. V. Srinivas, “User-centric cell-free massive MIMO networks: A survey of opportunities, challenges and solutions,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 611–652, 1st Quart., 2022.
- [256] Telefónica, Huawei complete first 5G UCNC RAN proof-of-concept test, Accessed date: Aug. 5, 2022. [Online]. Available: <https://www.bnamericas.com/en/news/telefonica-huawei-complete-first-5g-ucnc-ran-proof-of-concept-test>
- [257] H. Q. Ngo, L.-N. Tran, T. Q. Duong, M. Matthaiou, and E. G. Larsson, “On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO,” *IEEE Trans. on Green Commun. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–39, Mar. 2018.
- [258] A. Papazafeiropoulos, H. Q. Ngo, P. Kourtessis, S. Chatzinotas, and J. M. Senior, “Towards optimal energy efficiency in cell-free massive MIMO systems,” *IEEE Trans. on Green Commun. Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 816–831, Jun. 2021.
- [259] J. Beysens, Q. Wang, M. Van Den Abeele, and S. Pollin, “BlendVLC: A cell-free VLC network architecture empowered by beamspot blending,” in *Proc. IEEE INFOCOM’21*, Vancouver, BC, Canada, May 2021, pp. 1–10.
- [260] C. Liu, W. Feng, Y. Chen, C.-X. Wang, and N. Ge, “Cell-free satellite-UAV networks for 6G wide-area Internet of things,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 4, pp. 1116–1131, Apr. 2021.
- [261] S. Redana, 5G evolution/6G architecture vision and enablers, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://www.6gchannel.com/wp-content/uploads/2020/12/5G-6G-Architecture-Redana.pdf>
- [262] Q. Yu, J. Ren, H. Zhou, and W. Zhang, “A cybertwin based network architecture for 6G,” in *Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Levi, Finland, May 2020, pp. 1–5.

- [263] Zhao, H. Zhou, B. Qian, Y. Xu, K. Yu, and X. S. Shen, “Joint reception and parallel base stations selection in uplink fully-decoupled RAN for 6G,” in *Proc. WCSP’21*, Changsha, China, Oct. 2021, pp. 1–5.
- [264] C. Zhang, P. Patras, and H. Haddadi, “Deep learning in mobile and wireless networking: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2224–2287, 3rd Quart., 2019.
- [265] IMT-2030 (6G) Promotion Group, White Paper on 6G Network Architecture Vision and Potential Key Technologies (in Chinese), White Paper, June 2021. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/JXqJbVTvbPvJE T15jRXKA>
- [266] Y. Li, J. Huang, Q. Sun, T. Sun, and S. Wang, “Cognitive service architecture for 6G core network,” *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 17, no. 10, pp. 7193–7203, Oct. 2021.
- [267] T. Zhang, K. Zhu, and D. Niyato, “A generative adversarial learning-based approach for cell outage detection in self-organizing cellular networks,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 171–174, Feb. 2020.
- [268] M.-J. Youssef, V. V. Veeravalli, J. Farah, C. A. Nour, and C. Douillard, “Resource allocation in NOMA-based self-organizing networks using stochastic multi-armed bandits,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 9, pp. 6003–6017, Sep. 2021.
- [269] D. Palacios, I. de-la-Bandera, A. Gomez-Andrades, L. Flores, and R. Barco, “Automatic feature selection technique for next generation self-organizing networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1272–1275, Jun. 2018.
- [270] J. Mei, X. Wang, and K. Zheng, “An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks,” *Intelligent and Converged Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 281–294, Dec. 2020.
- [271] M. Grieves, Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, White Paper, vol. 1, pp. 17, Mar. 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_T\\_win\\_Manufacturing\\_Excelle nce\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_T_win_Manufacturing_Excelle nce_through_Virtual_Factory_Replication)
- [272] Y. Wu, K. Zhang, and Y. Zhang, “Digital twin networks: A survey,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 18, pp. 13 789–13 804, Sep. 2021.
- [273] H. Ahmadi, A. Nag, Z. Khar, K. Sayrafian, and S. Rahardja, “Networked twins and twins of networks: An overview on the relationship between digital twins and 6G,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 154–160, Dec. 2021.
- [274] H. X. Nguyen, R. Trestian, D. To, and M. Tatipamula, “Digital twin for 5G and beyond,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 10–15, Feb. 2021.
- [275] Q. Yu, J. Ren, Y. Fu, Y. Li, and W. Zhang, “Cybertwin: An origin of next generation network architecture,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 6, pp. 111–117, Dec. 2019.
- [276] J. Li, W. Shi, Q. Ye, S. Zhang, W. Zhuang, and X. Shen, “Joint virtual network topology design and embedding for cybertwin-enabled 6G core networks,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 22, pp. 16 313–16 325, Nov. 2021.
- [277] W. Wang, L. Tang, C. Wang, and Q. Chen, “Real-time analysis of multiple root causes for anomalies assisted by digital twin in NFV environment,” *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*,

vol. 19, no. 2, pp. 905–921, Jun. 2022.

- [278] F. Naeem, G. Kaddoum, and M. Tariq, “Digital twin-empowered network slicing in B5G networks: Experience-driven approach,” in *Proc. 2021 IEEE GC Wkshps '21*, Madrid, Spain, Dec. 2021, pp. 1–5.
- [279] T. Do-Duy, D. Van Huynh, O. A. Dobre, B. Canberk, and T. Q. Duong, “Digital twin-aided intelligent offloading with edge selection in mobile edge computing,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 806–810, Apr. 2022.
- [280] T. Liu, L. Tang, W. Wang, Q. Chen, and X. Zeng, “Digital-twin-assisted task offloading based on edge collaboration in the digital twin edge network,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1427–1444, Jan. 2022.
- [281] Y. Lu, X. Huang, K. Zhang, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Communication-efficient federated learning and permissioned blockchain for digital twin edge networks,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 4, pp. 2276–2288, Feb. 2021.
- [282] Y. Lu, X. Huang, K. Zhang, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks,” *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 17, no. 7, pp. 5098–5107, Jul. 2021.
- [283] Y. Lu, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Adaptive edge association for wireless digital twin networks in 6G,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 22, pp. 16 219–16 230, Nov. 2021.
- [284] H. Haas, J. Elmighani, and I. White, “Optical wireless communication,” *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. 378, no. 2169, pp. 51–61, Mar. 2020.
- [285] K. M. S. Huq, S. A. Busari, J. Rodriguez, V. Frascolla, W. Bazzi, and D. C. Sicker, “Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultrafast networks: A brief survey,” *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 4, pp. 89–95, Jul. 2019.
- [286] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, “Terahertz band: The last piece of RF spectrum puzzle for communication systems,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 1–32, Nov. 2020.
- [287] H. Sariahdeen, N. Saeed, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Next generation terahertz communications: A rendezvous of sensing, imaging, and localization,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 5, pp. 69–75, May 2020.
- [288] H. Sariahdeen, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, “An overview of signal processing techniques for terahertz communications,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 10, pp. 1628–1665, Oct. 2021.
- [289] H. Do, S. Cho, J. Park, H.-J. Song, N. Lee, and A. Lozano, “Terahertz line-of-sight MIMO communication: Theory and practical challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 3, pp. 104–109, Mar. 2021.
- [290] S. Ghafoor, N. Boujnah, M. H. Rehmani, and A. Davy, “MAC protocols for terahertz communication: A comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2236–2282, 4th Quart., 2020.
- [291] A. Al-Kinani, C.-X. Wang, L. Zhou, and W. Zhang, “Optical wireless communication channel measurements and models,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 1939–1962, 3rd

Quart., 2018.

- [292] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and O. Gnawali, “Visible light communication: Concepts, applications and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3204–3237, 4th Quart., 2019.
- [293] B. Wang and K. R. Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 5, no. 1, pp. 5–23, Feb. 2011.
- [294] Y.-C. Liang, Q. Zhang, E. G. Larsson, and G. Y. Li, “Symbiotic radio: Cognitive backscattering communications for future wireless networks,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 4, pp. 1242–1255, Dec. 2020.
- [295] S. Bhattarai, J.-M. J. Park, B. Gao, K. Bian, and W. Lehr, “An overview of dynamic spectrum sharing: Ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research,” *IEEE Trans. Cogn. Commun.*, vol. 2, no. 2, pp. 110–128, Jun. 2016.
- [296] Z. Wei et al., “Orthogonal time-frequency space modulation: A promising next-generation waveform,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 4, pp. 136–144, Aug. 2021.
- [297] Darwazeh, H. Ghannam, and T. Xu, “The first 15 years of SEFDM: A brief survey,” in *Proc. CSNDSP’18*, Jul. 2018, pp. 1–7.
- [298] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, “Index modulation techniques for next-generation wireless networks,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16 693–16 746, Aug. 2017.
- [299] D. J. Costello and G. D. Forney, “Channel coding: The road to channel capacity,” *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 6, pp. 1150–1177, Jun. 2007.
- [300] S. Shao et al., “Survey of Turbo, LDPC, and polar decoder ASIC implementations,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2309–2333, 3rd Quart., 2019.
- [301] Y. Chen et al., “Toward the standardization of non-orthogonal multiple access for next generation wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 3, pp. 19–27, Mar. 2018.
- [302] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, “A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, Oct. 2017.
- [303] IMT-2030 (6G) Promotion Group, Research report on ultra-massive MIMO antenna (in Chinese), Sep. 2021. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/AgkbROimULupO-lCrbw>
- [304] Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, and L. Hanzo, “Cellfree massive MIMO: A new next-generation paradigm,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99 878–99 888, Jul. 2019.
- [305] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung, and X. Li, “In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 500–524, 2nd Quart., 2015.
- [306] E. Kolodziej, B. T. Perry, and J. S. Herd, “In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 67, no. 7, pp. 3025–3041, Jul. 2019.
- [307] R. Chen, H. Zhou, M. Moretti, X. Wang, and J. Li, “Orbital angular momentum waves:

- Generation, detection, and emerging applications,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 2, pp. 840–868, 2nd Quart., 2020.
- [308] H. Yang, S. Zheng, W. He, X. Yu, and X. Zhang, “Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication,” *China Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 131–152, May 2021.
- [309] Liu, Y. Cheng, X. Li, and Y. Gao, “Microwave-sensing technology using orbital angular momentum: Overview of its advantages,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 2, pp. 112–118, Jun. 2019.
- [310] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, Aug. 2019.
- [311] Y. Liu et al., “Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 3rd Quart., 2021.
- [312] Di Renzo et al., “Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, Nov. 2020.
- [313] Di Renzo et al., “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 798–807, Jun. 2020.
- [314] T. Cui et. al, Research Report on Reconfigurable Intelligent Surface (in Chinese), IMT-2030 (6G) Promotion Group, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/HGFf0fbQg vCLSj46UIWpg>
- [315] C. Pan et al., “Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, Jun. 2021.
- [316] White Paper on Broadband Connectivity in 6G, White Paper, Apr. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2004.14247.pdf>
- [317] IMT-2030 (6G) Promotion Group, Research Report on Wireless Artificial Intelligence (AI) (in Chinese), Sep. 2015. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/haxc9Jz GR3dF4RasPinaA>
- [318] C. Zhang, Y.-L. Ueng, C. Studer, and A. Burg, “Artificial intelligence for 5G and beyond 5G: Implementations, algorithms, and optimizations,” *IEEE J. Emerging Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 149–163, Jun. 2020.
- [319] T. O’Shea and J. Hoydis, “An introduction to deep learning for the physical layer,” *IEEE Trans. Cogn. Commun.*, vol. 3, no. 4, pp. 563–575, Dec. 2017.
- [320] L. Zhang, Y. Cui, M. Wang, Z. Yang, and Y. Jiang, “Machine learning for Internet congestion control: Techniques and challenges,” *IEEE Internet Comput.*, vol. 23, no. 5, pp. 59–64, Sep. 2019.
- [321] IMT-2030 (6G) Promotion Group, Research Report on Integrated Sensing And Communication (ISAC) Technologies (in Chinese), Sept, 2021. [Online]. Available: <https://mp.weixin.qq.com/s/2Wq0Cf2DW57R5nAaRZIS3w>
- [322] J. A. Zhang et al., “Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a



- survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 306–345, 1st Quart., 2022.
- [323] J. A. Zhang et al., “An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 15, no. 6, pp. 1295–1315, Nov. 2021.
- [324] D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, and Y. C. Eldar, “Joint radar communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 37, no. 4, pp. 85–97, Jul. 2020.
- [325] Z. Xiao and Y. Zeng, “An overview on integrated localization and communication towards 6G,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 65, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11432-020-3218-8.
- [326] J. Wang, X. Ling, Y. Le, Y. Huang, and X. You, “Blockchain-enabled wireless communications: A new paradigm towards 6G,” *Natl. Sci. Rev.*, vol. 8, no. 9, p. nwab069, Sep. 2021.
- [327] M. B. H. Weiss, K. Werbach, D. C. Sicker, and C. E. C. Bastidas, “On the application of blockchains to spectrum management,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 193–205, Jun. 2019.
- [328] X. S. Shen et al., “Blockchain for transparent data management toward 6G,” *Engineering(Elsevier)*, vol. 8, pp. 74–85, Jan. 2022.
- [329] P. P. Ray, D. Dash, K. Salah, and N. Kumar, “Blockchain for IoT-based healthcare: Background, consensus, platforms, and use cases,” *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 85–94, Mar. 2021.
- [330] M. B. Mollah et al., “Blockchain for the Internet of vehicles towards intelligent transportation systems: A survey,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 6, pp. 4157–4185, Mar. 2021.
- [331] P. Zhuang, T. Zamir, and H. Liang, “Blockchain for cybersecurity in smart grid: A comprehensive survey,” *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 17, no. 1, pp. 3–19, May 2021.
- [332] X. Luo, H.-H. Chen, and Q. Guo, “Semantic communications: Overview, open issues, and future research directions,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 210–219, Feb. 2022.
- [333] C. Boyer and S. Roy, “Backscatter communication and RFID: Coding, energy, and MIMO analysis,” *IEEE Trans. Commun.*, Mar. 2013.
- [334] Y. Xu, H. Yang, Y. Ye, Q. Chen, and G. Lu, “A survey on resource allocation in backscatter communication networks (in Chinese),” *Chinese J. Int. Things*, vol. 5, no. 03, pp. 56–69, Sep. 2021.
- [335] IMT.Future technology trends of terrestrial IMT systems towards 2030 and beyond, Int. Telecommun. Union, Geneva, Switzerland, Rep. ITU-R M.1295-E, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/md/R19-WP5D-C-1295/en>
- [336] T. S. Rappaport et al., “Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78 729–78 757, Jun. 2019.
- [337] Y. Liu et al., “Development of 340-GHz transceiver front end based on GaAs monolithic integration technology for THz active imaging array,” *Appl. Sci-Basel*, vol. 10, no. 21, Nov. 2020.
- [338] J. Wang, C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, and X. Gao, “A general 3D space-time-frequency

- non-stationary THz channel model for 6G ultra-massive MIMO wireless communication systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1576–1589, Jun. 2021.
- [339] H. Sardeddeen, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, “Terahertz-band ultra-massive spatial modulation MIMO,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 9, pp. 2040–2052, Sep. 2019.
- [340] J. Zhang et al., “6G oriented 100 GbE real-time demonstration of fiber-THz-fiber seamless communication enabled by photonics,” in *Proc. OFC22*, Mar. 2022, pp. 1–3.
- [341] J. Zhang et al., “Demonstration of real-time 125.516 Gbit/s transparent fiber-THz-fiber link transmission at 360 GHz ~ 430 GHz based on photonic down-conversion,” in *Proc. OFC22*, Mar. 2022, pp. 1–3.
- [342] T. Koonen, “Indoor optical wireless systems: Technology, trends, and applications,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 8, pp. 1459–1467, Apr. 2018.
- [343] E. Calvanese Strinati et al., “6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 42–50, Sep. 2019.
- [344] I. Tavakkolnia et al., “Organic photovoltaics for simultaneous energy harvesting and high-speed MIMO optical wireless communications,” *Light Sci. Appl.*, vol. 10, no. 1, p. 41, Dec. 2021.
- [345] W. Xu et al., “The design, implementation, and deployment of a smart lighting system for smart buildings,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 6, no. 4, pp. 7266–7281, Aug. 2019.
- [346] A. Perera, M. Katz, R. Godaliyadda, J. Hakkinen, and E. Strommer, “Light-based Internet of things: Implementation of an optically connected energy-autonomous node,” in *Proc. IEEE WCNC’21*, Nanjing, China, Mar. 2021, pp. 1–7.
- [347] C. Lee et al., “26 Gbit/s LiFi system with laser-based white light transmitter,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1432–1439, Mar. 2022.
- [348] X. He et al., “1 Gbps free-space deep-ultraviolet communications based on III-nitride micro-LEDs emitting at 262 nm,” *Photon. Res.*, vol. 7, no. 7, p. B41, Jul. 2019.
- [349] M. Dehghani Soltani et al., “Safety analysis for laser-based optical wireless communications: A tutorial,” *Proc. IEEE*, vol. 110, no. 8, pp. 1045–1072, Aug. 2022.
- [350] A. S. Hamza, J. S. Deogun, and D. R. Alexander, “Classification framework for free space optical communication links and systems,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1346–1382, 2nd Quart., 2019.
- [351] H. Kazemi et al., “A Tb/s indoor MIMO optical wireless backhaul system using VCSEL arrays,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, no. 6, pp. 3995–4012, Jun. 2022.
- [352] K. Yoshida et al., “245 MHz bandwidth organic light-emitting diodes used in a gigabit optical wireless data link,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 1171, Dec. 2020.
- [353] W. Matthews, Z. Ahmed, W. Ali, and S. Collins, “A 3.45 gigabits/s sipm-based OOK VLC receiver,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 487–490, May 2021.
- [354] M. D. Soltani, A. A. Purwita, Z. Zeng, H. Haas, and M. Safari, “Modeling the random orientation of mobile devices: Measurement, analysis and lifi use case,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 3, pp. 2157–2172, Mar. 2019.

- [355] M. A. Arfaoui et al., “Measurements-based channel models for indoor lifi systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 827–842, Feb. 2021.
- [356] A. Yesilkaya, R. Bian, I. Tavakkolnia, and H. Haas, “OFDM-based optical spatial modulation,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 13, no. 6, pp. 1433–1444, Oct. 2019.
- [357] Y. S. Eroglu, C. K. Anjinappa, I. Guvenc, and N. Pala, “Slow beam steering and NOMA for indoor multi-user visible light communications,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 20, no. 4, pp. 1627–1641, Apr. 2021.
- [358] N. Su, E. Panayirci, M. Koca, A. Yesilkaya, H. V. Poor, and H. Haas, “Physical layer security for multi-user MIMO visible light communication systems with generalized space shift keying,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 4, pp. 2585–2598, Apr. 2021.
- [359] J. Mitola, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,” in *Proc. IEEE MoMuC’99*, San Diego, CA, USA, Nov. 1999, pp. 3–10.
- [360] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [361] K. Zhang, S. Leng, X. Peng, L. Pan, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Artificial intelligence inspired transmission scheduling in cognitive vehicular communications and networks,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 6, no. 2, pp. 1987–1997, Apr. 2019.
- [362] Q. Zhang, L. Zhang, Y.-C. Liang, and P.-Y. Kam, “Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and Internet-of-things networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20 000–20 013, Feb. 2019.
- [363] R. Long, Y.-C. Liang, H. Guo, G. Yang, and R. Zhang, “Symbiotic radio: A new communication paradigm for passive Internet of things,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 7, no. 2, pp. 1350–1363, Feb. 2020.
- [364] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, “Dynamic spectrum sharing in 5G wireless networks with full-duplex technology: Recent advances and research challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 674–707, 1st Quart., 2018.
- [365] O. Naparstek and K. Cohen, “Deep multi-user reinforcement learning for distributed dynamic spectrum access,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 1, pp. 310–323, Jan. 2019.
- [366] S. Jacob et al., “A novel spectrum sharing scheme using dynamic long short-term memory with CP-OFDMA in 5G networks,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 926–934, Sep. 2020.
- [367] S. Hu, Y.-C. Liang, Z. Xiong, and D. Niyato, “Blockchain and artificial intelligence for dynamic resource sharing in 6G and beyond,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 4, pp. 145–151, Aug. 2021.
- [368] T. Nitsche, C. Cordeiro, A. Flores, E. Knightly, E. Perahia, and J. Widmer, “IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz communication for multi-gigabit-per-second Wi-Fi [invited paper],” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 12, pp. 132–141, Dec. 2014.
- [369] D. Li, “Overlapped multiplexing principle and an improved capacity on additive white gaussian noise channel,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6840–6848, Dec. 2018.
- [370] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, “Near shannon limit error-correcting coding and

- decoding: Turbo-codes. 1,” in *Proc. IEEE ICC’93*, vol. 2, Geneva, Switzerland, 1993, pp. 1064–1070.
- [371] R. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *IRE Trans. Infor. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, Jan. 1962.
- [372] E. Arkan, “Channel polarization: A method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073, Jul. 2009.
- [373] F. R. Kschischang, B. J. Frey, and H.-A. Loeliger, “Factor graphs and the sum-product algorithm,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 498–519, Feb. 2001.
- [374] N. Wiberg, H.-A. Loeliger, and R. Kotter, “Codes and iterative decoding on general graphs,” *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 6, no. 5, pp. 513–525, Sep. 1995.
- [375] U. U. Fayyaz and J. R. Barry, “Low-complexity soft-output decoding of polar codes,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 32, no. 5, pp. 958–966, May 2014.
- [376] I. Tal and A. Vardy, “List decoding of polar codes,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213–2226, Mar. 2015.
- [377] O. Afisiadis, A. Balatsoukas-Stimming, and A. Burg, “A low complexity improved successive cancellation decoder for polar codes,” in *Proc. 2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, Nov. 2014, pp. 2116–2120.
- [378] A. Elkelesh, M. Ebada, S. Cammerer, and S. ten Brink, “Belief propagation list decoding of polar codes,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 1536–1539, Aug. 2018.
- [379] Y. Shen, W. Song, Y. Ren, H. Ji, X. You, and C. Zhang, “Enhanced belief propagation decoder for 5G polar codes with bit-flipping,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 67, no. 5, pp. 901–905, May 2020.
- [380] S. Brink, “Defining turbo codes as irregular LDPC codes,” in *Proc. 2013 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Aug. 2013.
- [381] J. Tong et al., “Fast polar codes for terabits-per-second throughput communications,” *arXiv:2107.08600 [cs, IT]*, Jul. 2021.
- [382] Studer, C. Benkeser, S. Belfanti, and Q. Huang, “Design and implementation of a parallel turbo-decoder ASIC for 3GPP-LTE,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 1, pp. 8–17, Jan. 2011.
- [383] H. Cui, F. Ghaffari, K. Le, D. Declercq, J. Lin, and Z. Wang, “Design of high-performance and area-efficient decoder for 5G LDPC codes,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Paper*, vol. 68, no. 2, pp. 879–891, Feb. 2021.
- [384] Y. Ren, A. T. Kristensen, Y. Shen, A. Balatsoukas Stimming, C. Zhang, and A. Burg, “A sequence repetition node-based successive cancellation list decoder for 5G polar codes: Algorithm and implementation,” *arXiv:2205.08857 [cs, IT]*, May 2022.
- [385] Condo, M. Martina, and G. Masera, “VLSI implementation of a multi-mode turbo/LDPC decoder architecture,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 60, no. 6, pp. 1441–1454, Jun. 2013.
- [386] S. Cao, T. Lin, S. Zhang, S. Xu, and C. Zhang, “A reconfigurable and pipelined architecture for standard-compatible LDPC and polar decoding,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 6, pp. 5431–5444, Jun. 2021.

- [387] M. Fossorier and S. Lin, “Soft decision decoding of linear block codes based on ordered statistics,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, no. 5, pp. 1379–13 496, Sep. 1995.
- [388] K. R. Duffy, J. Li, and M. Medard, “Capacity-achieving guessing random additive noise decoding,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 65, no. 7, pp. 4023–4040, Jul. 2019.
- [389] Arkan, “From sequential decoding to channel polarization and back again,” *arXiv:1908.09594 [cs, IT]*, Sep. 2019.
- [390] X. You et al., “Spatiotemporal 2-D channel coding for very low latency reliable MIMO transmission,” in *Proc. IEEE Globecom Workshops2022 (GC Wkshps)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 473–479.
- [391] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access,” in *Proc. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, Jun. 2013, pp. 1–5.
- [392] B. Makki, K. Chitti, A. Behravan, and M.-S. Alouini, “A survey of NOMA: Current status and open research challenges,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 179–189, Jan. 2020.
- [393] M. Vaezi, G. A. Aruma Baduge, Y. Liu, A. Arafa, F. Fang, and Z. Ding, “Interplay between NOMA and other emerging technologies: A survey,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 900–919, Dec. 2019.
- [394] M. Zeng, N.-P. Nguyen, O. A. Dobre, and H. V. Poor, “Securing downlink massive MIMO-NOMA networks with artificial noise,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 13, no. 3, pp. 685–699, Jun. 2019.
- [395] X. Liu, Y. Liu, Y. Chen, and H. V. Poor, “RIS enhanced massive non-orthogonal multiple access networks: Deployment and passive beamforming design,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 4, pp. 1057–1071, Apr. 2021.
- [396] X. Li et al., “Hardware impaired ambient backscatter NOMA systems: Reliability and security,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 4, pp. 2723–2736, Apr. 2021.
- [397] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [398] B. Wang, F. Gao, S. Jin, H. Lin, and G. Y. Li, “Spatial- and frequency wideband effects in millimeter-wave massive MIMO systems,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 66, no. 13, pp. 3393–3406, Jul. 2018.
- [399] X. Yu, J.-C. Shen, J. Zhang, and K. B. Letaief, “Alternating minimization algorithms for hybrid precoding in millimeter wave MIMO systems,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 10, no. 3, pp. 485–500, Apr. 2016.
- [400] N. J. Myers and R. W. Heath, “Infocus: A spatial coding technique to mitigate misfocus in near-field LoS beamforming,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 2193–2209, Apr. 2022.
- [401] X. Wei and L. Dai, “Channel estimation for extremely large-scale massive MIMO: Far-field, near-field, or hybrid-field?” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 1, pp. 177–181, Jan. 2022.
- [402] J. Huang, C.-X. Wang, H. Chang, J. Sun, and X. Gao, “Multi-frequency multi-scenario millimeter wave MIMO channel measurements and modeling for B5G wireless communication

- systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 9, pp. 2010–2025, Sep. 2020.
- [403] Zhao et al., “Millimeter-wave integrated phased arrays,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 68, no. 10, pp. 3977–3990, Oct. 2021.
- [404] Z.-Q. He and X. Yuan, “Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 210–214, Feb. 2020.
- [405] V. Jamali, A. M. Tulino, G. Fischer, R. R. Muller, and R. Schober, “Intelligent surface-aided transmitter architectures for millimeter-wave ultra massive MIMO systems,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 144–167, Dec. 2021.
- [406] Y. Wang, X. Chen, Y. Cai, and L. Hanzo, “RIS-aided hybrid massive MIMO systems relying on adaptive-resolution adcs: Robust beamforming design and resource allocation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 3, pp. 3281–3286, Mar. 2022.
- [407] Z. Chen and E. Bjornson, “Channel hardening and favorable propagation in cell-free massive MIMO with stochastic geometry,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5205–5219, Nov. 2018.
- [408] X. Wei, C. Hu, and L. Dai, “Deep learning for beamspace channel estimation in millimeter-wave massive MIMO systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 1, pp. 182–193, Jan. 2021.
- [409] M. A. Albreem, A. H. Alhabbash, S. Shahabuddin, and M. Juntti, “Deep learning for massive MIMO uplink detectors,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 741–766, 1st Quart., 2022.
- [410] L. You, K.-X. Li, J. Wang, X. Gao, X.-G. Xia, and B. Ottersten, “Massive MIMO transmission for LEO satellite communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1851–1865, Aug. 2020.
- [411] X. Yu, A.-A. Lu, X. Gao, G. Y. Li, G. Ding, and C.-X. Wang, “HF skywave massive MIMO communication,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 2769–2785, Apr. 2022.
- [412] W. Wu, X. Gao, C. Sun, and G. Y. Li, “Shallow underwater acoustic massive MIMO communications,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 69, pp. 1124–1139, Jan. 2021.
- [413] J. F. O’Hara and G. M. Moore, “A high performance cw receiver using feedthru nulling,” *Microw. J.*, vol. 6, no. 9, pp. 63–71, Sep. 1963.
- [414] W. Liu, K. Huang, X. Zhou, and S. Durrani, “Full-duplex backscatter interference networks based on time-hopping spread spectrum,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4361–4377, Jul. 2017.
- [415] M. Yilan, H. Ayar, H. Nawaz, O. Gurbuz, and I. Tekin, “Monostatic antenna in-band full duplex radio: Performance limits and characterization,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 4786–4799, May 2019.
- [416] M. K. Hanawal, D. N. Nguyen, and M. Krunz, “Cognitive networks with in-band full-duplex radios: Jamming attacks and countermeasures,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 1, pp. 296–309, Mar. 2020.
- [417] S. A. Hassani et al., “In-band full-duplex radar-communication system,” *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 1086–1097, Mar. 2021.
- [418] H. Nawaz and I. Tekin, “Double-differential-fed, dual-polarized patch antenna with 90 dB

- interport RF isolation for a 2.4 GHz in-band full-duplex transceiver,” *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 287–290, Feb. 2018.
- [419] K. Komatsu, Y. Miyaji, and H. Uehara, “Iterative nonlinear self-interference cancellation for in-band full-duplex wireless communications under mixer imbalance and amplifier nonlinearity,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 7, pp. 4424–4438, Jul. 2020.
- [420] K. Komatsu, Y. Miyaji, and H. Uehara, “Theoretical analysis of inband full-duplex radios with parallel hammerstein self-interference cancellers,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 10, pp. 6772–6786, Oct. 2021.
- [421] M. P. Chang, E. C. Blow, M. Z. Lu, J. J. Sun, and P. R. Prucnal, “RF characterization of an integrated microwave photonic circuit for self-interference cancellation,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 66, no. 1, pp. 596–605, Jan. 2018.
- [422] D. Wang et al., “Photonics-assisted frequency conversion and self-interference cancellation for in-band full-duplex communication,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 607–614, Feb. 2022.
- [423] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, “Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerregaussian laser modes,” *Physical Review A*, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189, Jun. 1992.
- [424] B. B. Yousif and E. E. Elsayed, “Performance enhancement of an orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical link under atmospheric turbulence effects using spatial-mode multiplexing and hybrid diversity based on adaptive MIMO equalization,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84 401–84 412, Jun. 2019.
- [425] Z. Jiang and D. H. Wener, *Electromagnetic Vortices: Wave Phenomena and Engineering Applications*. Nanjing, China: Wiley-IEEE Press, 2022.
- [426] Z. Zhang, S. Zheng, Y. Chen, X. Jin, H. Chi, and X. Zhang, “The capacity gain of orbital angular momentum based multiple-input multiple-output system,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, pp. 25 418–25 428, May 2016.
- [427] Y. Lei, Y. Yang, Y. Wang, K. Guo, Y. Gong, and Z. Guo, “Throughput performance of wireless multiple-input multiple-output systems using OAM antennas,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 261–265, Feb. 2021.
- [428] W. Xue, X. Chen, X. Liu, X. Meng, A. Zhang, and W. E. I. Sha, “A revisit of orbital angular momentum multiplexing in multipath environment,” *IEEE J. Commun. Inf. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 438–446, Dec. 2020.
- [429] O. Edfors and A. J. Johansson, “Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 60, no. 2, pp. 1126–1131, Oct. 2012.
- [430] Y. Yagi, H. Sasaki, T. Yamada, and D. Lee, “200 Gb/s wireless transmission using dual-polarized OAM-MIMO multiplexing with uniform circular array on 28 GHz band,” *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 833–837, May 2021.
- [431] T. Hu, Y. Wang, X. Liao, J. Zhang, and Q. Song, “OFDM-OAM modulation for future wireless communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 59 114–59 125, May 2019.

- [432] L. Liang, W. Cheng, W. Zhang, and H. Zhang, “Joint OAM multiplexing and OFDM in sparse multipath environments,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 4, pp. 3864–3878, Apr. 2020.
- [433] A. A. Amin and S. Y. Shin, “Channel capacity analysis of non-orthogonal multiple access with OAM-MIMO system,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 1481–1485, Sep. 2020.
- [434] M. D. Renzo et al., “Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come,” *J. Wireless Commun. Network*, vol. 129, no. 1, May 2019.
- [435] C. Huang et al., “Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 118–125, Oct. 2020.
- [436] N. Yu et al., “Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction,” *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333–337, Oct. 2011.
- [437] T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, and Q. Cheng, “Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials,” *Light: Science & Applications*, vol. 3, no. 10, pp. e218–e218, Oct. 2014.
- [438] W. Tang et al., “Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 421–439, Jan. 2021.
- [439] E. Basar, I. Yildirim, and F. Kilinc, “Indoor and outdoor physical channel modeling and efficient positioning for reconfigurable intelligent surfaces in mmWave bands,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 12, pp. 8600–8611, Dec. 2021.
- [440] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, “Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 4157–4170, Aug. 2019.
- [441] E. Basar, “Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 3187–3196, May 2020.
- [442] X. Chen et al., “Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 10, pp. 2155–2159, Oct. 2021.
- [443] G. Yang, X. Xu, Y.-C. Liang, and M. D. Renzo, “Reconfigurable intelligent surface-assisted non-orthogonal multiple access,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 3137–3151, May 2021.
- [444] C. Huang, R. Mo, and C. Yuen, “Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1839–1850, Aug. 2020.
- [445] M. Nemati, J. Park, and J. Choi, “RIS-assisted coverage enhancement in millimeter-wave cellular networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188 171–188 185, Oct. 2020.
- [446] B. Sihlbom, M. I. Poulakis, and M. Di Renzo, “Reconfigurable intelligent surfaces: Performance assessment through a system-level simulator,” pp. 1–10, Aug. 2022, doi: 10.1109/MWC.015.2100668.
- [447] J. Yuan, Y.-C. Liang, J. Joung, G. Feng, and E. G. Larsson, “Intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio system,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 1, pp. 675–687, Jan. 2021.



- [448] E. Bjornson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO is a reality—what is next?: Five promising research directions for antenna arrays,” *Digital Signal Process.*, vol. 94, pp. 3–20, Nov. 2019.
- [449] R. Deng, B. Di, H. Zhang, Y. Tan, and L. Song, “Reconfigurable holographic surface: Holographic beamforming for metasurface-aided wireless communications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 6, pp. 6255–6259, Jun. 2021.
- [450] Z. Wan, Z. Gao, F. Gao, M. D. Renzo, and M.-S. Alouini, “Terahertz massive MIMO with holographic reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 7, pp. 4732–4750, Jul. 2021.
- [451] M. R. Konkol et al., “High-power photodiode-integrated-connected array antenna,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, no. 10, pp. 2010–2016, May 2017.
- [452] X. You, C. Zhang, X. Tan, S. Jin, and H. Wu, “AI for 5G: Research directions and paradigms,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 62, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1007/s11432-018-9596-5.
- [453] J. Huang et al., “A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems,” *IEEE Trans. Big Data*, vol. 6, no. 2, pp. 211–222, Jun. 2020.
- [454] S. Yin, Y. Li, Y. Tian, and F. R. Yu, “Intelligent reflecting surface enhanced wireless communications with deep-learning-based channel prediction,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 1, pp. 1049–1053, 2022.
- [455] H. Ye, G. Y. Li, and B.-H. Juang, “Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 114–117, 2018.
- [456] J. Gao, M. Hu, C. Zhong, G. Y. Li, and Z. Zhang, “An attention-aided deep learning framework for massive MIMO channel estimation,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 1823–1835, Mar. 2022.
- [457] S. Dorner, S. Cammerer, J. Hoydis, and S. ten Brink, “Deep learning based communication over the air,” *IEEE J. Sel. Top. Sign. Proces.*, vol. 12, no. 1, pp. 132–143, 2018.
- [458] S. Cammerer, F. A. Aoudia, S. Dorner, M. Stark, J. Hoydis, and S. ten Brink, “Trainable communication systems: Concepts and prototype,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 9, pp. 5489–5503, Sep. 2020.
- [459] N. Farsad, M. Rao, and A. Goldsmith, “Deep learning for joint sourcechannel coding of text,” in *Proc. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 2326–2330.
- [460] A. Buchberger, C. Hager, H. D. Pfister, L. Schmalen, and A. Graell i Amat, “Pruning and quantizing neural belief propagation decoders,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 7, pp. 1957–1966, Jul. 2021.
- [461] Z. Zhao, M. C. Vuran, F. Guo, and S. D. Scott, “Deep-waveform: A learned OFDM receiver based on deep complex-valued convolutional networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 8, pp. 2407–2420, 2021.
- [462] F. A. Aoudia and J. Hoydis, “Joint learning of probabilistic and geometric shaping for coded modulation systems,” in *Proc. GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, 2020*, pp. 1–6.

- [463] X. Gao, L. Dai, Y. Zhang, T. Xie, X. Dai, and Z. Wang, “Fast channel tracking for terahertz beamspace massive MIMO systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 7, pp. 5689–5696, Jul. 2017.
- [464] A. M. Elbir and A. K. Papazafeiropoulos, “Hybrid precoding for multiuser millimeter wave massive MIMO systems: A deep learning approach,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 552–563, 2020.
- [465] Z. Zhang, Y. Li, C. Huang, Q. Guo, C. Yuen, and Y. L. Guan, “DNNaided block sparse bayesian learning for user activity detection and channel estimation in grant-free non-orthogonal random access,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 12, pp. 12 000–12 012, 2019.
- [466] W. Kim, Y. Ahn, and B. Shim, “Deep neural network-based active user detection for grant-free NOMA systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 4, pp. 2143–2155, Apr. 2020.
- [467] J. Zhu, Y. Song, D. Jiang, and H. Song, “A new deep-Q-learningbased transmission scheduling mechanism for the cognitive Internet of things,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 5, no. 4, pp. 2375–2385, 2018.
- [468] W. Cui, K. Shen, and W. Yu, “Spatial deep learning for wireless scheduling,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 6, pp. 1248–1261, Jun. 2019.
- [469] J. Hoydis, F. A. Aoudia, A. Valcarce, and H. Viswanathan, “Toward a G AI-native air interface,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 5, pp. 76–81, 2021.
- [470] J. Gao, M. Li, W. Zhuang, X. Shen, and X. Li, “MAC for machinetype communications in industrial IoT Part II: Scheduling and numerical results,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 12, pp. 9958–9969, Jun. 2021.
- [471] F. Wang, X. Zhu, M. Chen, and H. Zhu, “High-precision indoor wireless positioning method based on generative adversarial network (in Chinese),” *Chinese J. Int. Things*, vol. 5, no. 2, pp. 107–115, 2021.
- [472] Y. Sun, M. Peng, Y. Zhou, Y. Huang, and S. Mao, “Application of machine learning in wireless networks: Key techniques and open issues,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3072–3108, 4th Quart., 2019.
- [473] H. Sun, X. Chen, Q. Shi, M. Hong, X. Fu, and N. D. Sidiropoulos, “Learning to optimize: Training deep neural networks for interference management,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 66, no. 20, pp. 5438–5453, 2018.
- [474] F. Liang, C. Shen, W. Yu, and F. Wu, “Towards optimal power control via ensembling deep neural networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 3, pp. 1760–1776, Mar. 2020.
- [475] Y. Fu, S. Wang, C.-X. Wang, X. Hong, and S. McLaughlin, “Artificial intelligence to manage network traffic of 5G wireless networks,” *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 6, pp. 58–64, Nov. 2018.
- [476] Y. Jiang, M. Ma, M. Bennis, F.-C. Zheng, and X. You, “User preference learning-based edge caching for fog radio access network,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 2, pp. 1268–1283, 2019.
- [477] W. Qi, Q. Li, Q. Song, L. Guo, and A. Jamalipour, “Extensive edge intelligence for future vehicular networks in 6G,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 4, pp. 128–135, Aug. 2021.
- [478] F. Zhou et al., “Intelligence-endogenous networks: Innovative network paradigm for 6G,” *IEEE*

*Wireless Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 40–47, Feb. 2022.

- [479] W. Wu et al., “Dynamic RAN slicing for service-oriented vehicular networks via constrained learning,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 7, pp. 2076–2089, Jul. 2021.
- [480] C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K.-C. Chen, and L. Hanzo, “Machine learning paradigms for next-generation wireless networks,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 2, pp. 98–105, Apr. 2017.
- [481] R. M. Mealey, “A method for calculating error probabilities in a radar communication system,” *IEEE Trans. Space Electron. Telem.*, vol. 9, no. 2, pp. 37–42, Jun. 1963.
- [482] C. Sturm and W. Wiesbeck, “Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1236–1259, Jul. 2011.
- [483] A. R. Chiriyath, B. Paul, G. M. Jacyna, and D. W. Bliss, “Inner bounds on performance of radar and communications co-existence,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 64, no. 2, pp. 464–474, Jan. 2016.
- [484] P. Kumari, J. Choi, N. Gonzalez-Prelcic, and R. W. Heath, “IEEE 802.11ad-based radar: An approach to joint vehicular communication radar system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3012–3027, Apr. 2018.
- [485] S. Nakamoto, Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system, Technical Report, 2008. [Online]. Available: <https://www.debr.io/article/21260>. pdf
- [486] X. Ling, J. Wang, T. Bouchoucha, B. C. Levy, and Z. Ding, “Blockchain radio access network (B-RAN): Towards decentralized secure radio access paradigm,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9714–9723, Jan. 2019.
- [487] N. Z. Aitzhan and D. Svetinovic, “Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams,” *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 15, no. 5, pp. 840–852, Sep. 2018.
- [488] J. Wan, J. Li, M. Imran, D. Li, and Fazal-e-Amin, “A blockchainbased solution for enhancing security and privacy in smart factory,” *IEEE Trans Ind. Informat.*, vol. 15, no. 6, pp. 3652–3660, Jun. 2019.
- [489] J. Backman, S. Yrjölä, K. Valtanen, and O. Mämmelä, “Blockchain network slice broker in 5G: Slice leasing in factory of the future use case,” in *Proc. 2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*, 2017, pp. 1–8.
- [490] L. Liu et al., “Blockchain-enabled secure data sharing scheme in mobile-edge computing: An asynchronous advantage actor–critic learning approach,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 4, pp. 2342–2353, Nov. 2021.
- [491] D. E. Kouicem, Y. Imine, A. Bouabdallah, and H. Lakhlef, “Decentralized blockchain-based trust management protocol for the Internet of things,” *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 19, no. 2, pp. 1292–1306, Mar. 2022.
- [492] Y. Hui et al., “BCC: Blockchain-based collaborative crowdsensing in autonomous vehicular networks,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 9, no. 6, pp. 4518–4532, Mar. 2022.
- [493] G. Shi, Y. Xiao, Y. Li, and X. Xie, “From semantic communication to semantic-aware

- networking: Model, architecture, and open problems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 8, pp. 44–50, Aug. 2021.
- [494] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, Jul. 1948.
- [495] C. E. Shannon and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, 1949.
- [496] Y. Bar-Hillel and R. Carnap, “Semantic information,” *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 4, no. 14, pp. 147–157, 1953.
- [497] J. Barwise and J. Perry, “Situations and attitudes,” *J. Philosophy*, vol. 78, no. 11, pp. 668–691, 1981.
- [498] L. Floridi, “Outline of a theory of strongly semantic information,” *Minds and Machines*, vol. 14, no. 2, pp. 197–221, May 2004.
- [499] J. Bao et al., “Towards a theory of semantic communication,” in *Proc. 2011 IEEE Netw. Science Workshop*, Jun. 2011, pp. 110–117.
- [500] Y. Zhong and R. Zhang, “Information ecology and semantic information,” *Doc. Inf. Knowl.*, vol. 0, no. 6, pp. 4–11, 2017, doi: 10.13366/j.dik.2017.06.004.
- [501] Y. Zhong, “A theory of semantic information,” *China Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2017.
- [502] K. Xu et al., “Research progress of network security architecture and key technologies based on blockchain (in Chinese),” *Chinese J. Comput.*, vol. 44, no. 1, pp. 1–29, Jan. 2021.
- [503] B. Guler, A. Yener, and A. Swami, “The semantic communication game,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 787–802, Dec. 2018.
- [504] H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, “Deep learning enabled semantic communication systems,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 69, pp. 2663–2675, Apr. 2021.
- [505] H. Xie and Z. Qin, “A lite distributed semantic communication system for Internet of things,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 1, pp. 142–153, Jan. 2021.
- [506] G. E. Dahl, D. Yu, L. Deng, and A. Acero, “Context-dependent pretrained deep neural networks for large-vocabulary speech recognition,” *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, vol. 20, no. 1, pp. 30–42, Jan. 2012.
- [507] J. Kimionis, A. Bletsas, and J. N. Sahalos, “Increased range bistatic scatter radio,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 3, pp. 1091–1104, Feb. 2014.
- [508] H. Stockman, “Communication by means of reflected power,” *Proc. IRE*, vol. 36, no. 10, pp. 1196–1204, Oct. 1948.
- [509] J. Kimionis, A. Georgiadis, S. N. Daskalakis, and M. M. Tentzeris, “A printed millimetre-wave modulator and antenna array for backscatter communications at gigabit data rates,” *Nature Electronics*, vol. 4, no. 6, pp. 439–446, Oct. 2021.
- [510] Z. B. Zawawi, Y. Huang, and B. Clerckx, “Multiuser wirelessly powered backscatter communications: Nonlinearity, waveform design, and SINR-energy tradeoff,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 1, pp. 241–253, Nov. 2018.
- [511] R. Duan, R. Jantti, H. Yi, J. G. R. gitler, and K. Ruttik, “On the achievable rate of bistatic modulated

- rescatter systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 10, pp. 9609–9613, Jun. 2017.
- [512] N. Fasarakis-Hilliard, P. N. Alevizos, and A. Bletsas, “Coherent detection and channel coding for bistatic scatter radio sensor networking,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 5, pp. 1798–1810, May 2015.
- [513] S. Kashyap, E. Bjornson, and E. G. Larsson, “On the feasibility of wireless energy transfer using massive antenna arrays,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 5, pp. 3466–3480, May 2016.
- [514] G. Yang, C. K. Ho, and Y. L. Guan, “Multi-antenna wireless energy transfer for backscatter communication systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 2974–2987, Sep. 2015.
- [515] D. Mishra and E. G. Larsson, “Optimal channel estimation for reciprocity-based backscattering with a full-duplex mimo reader,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 67, no. 6, pp. 1662–1677, Jan. 2019.
- [516] T. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang, and H. Q. Ngo, *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [517] 3GPP Features and Study Items. Accessed date: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/dynareport?code=FeatureListFrameSet.html>
- [518] 3GPP List of Work Items. Accessed date: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/dynareport?code=WI-List.html>
- [519] IEEE Standards Association. Accessed date: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/>
- [520] ETSI Committees: Our Technical Groups. Accessed date: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.etsi.org/committees>
- [521] ITU: Committed to Connected the World. Accessed date: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/>
- [522] C.-X. Wang, Z. Lv, X. Gao, X.-H. You, Y. Hao, and H. Haas, “Pervasive channel modeling theory and applications to 6G GBSMs for all frequency bands and all scenarios,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 9, pp. 9159–9173, Sep. 2022.
- [523] J. Huang, Y. Liu, C.-X. Wang, J. Sun, and H. Xiao, “5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: Recent developments and future challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 1, pp. 138–145, Jan. 2019.
- [524] J. O. Nielsen, W. Fan, P. C. F. Eggers, and G. F. Pedersen, “A channel sounder for massive MIMO and mmwave channels,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 12, pp. 67–73, Dec. 2018.
- [525] A. Karttunen and K. Haneda, “Large-scale parameter estimation in channel sounding with limited dynamic range,” in *Proc. 2019 13<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Jun. 2019, pp. 1–5.
- [526] R. He et al., “Channel measurements and modeling for 5G communication systems at 3.5 GHz band,” in *Proc. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, Seoul, Korea (South), Aug. 2016, pp. 1855–1858.
- [527] Z. Zhou, C.-X. Wang, X. Chen, L. Zhang, J. Huang, and X. Wu, “Measurements and Modeling

- of sub-6 GHz multi-frequency wireless channel correlations in urban micro scenarios,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, to be submitted.
- [528] L. Zhang et al., “Multi-frequency wireless channel measurements and characterization in large indoor office environments,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, accepted for publication.
- [529] J. Zhang, Y. Zhang, Y. Yu, R. Xu, Q. Zheng, and P. Zhang, “3-D MIMO: How much does it meet our expectations observed from channel measurements?” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 8, pp. 1887–1903, Aug. 2017.
- [530] L. Zhou, L. Xiao, Z. Yang, J. Li, J. Lian, and S. Zhou, “Path loss model based on cluster at 28 GHz in the indoor and outdoor environments,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 60, no. 8, Aug. 2017, doi: 10.1007/s11432-017-9127-6.
- [531] J. Li, P. Zhang, C. Yu, H. Wang, and W. Hong, “High-efficiency wideband millimeter-wave channel sounder system,” in *Proc. 2019 13<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, Mar. 2019, pp. 1–5.
- [532] N. A. Abbasi, A. Hariharan, A. M. Nair, and A. F. Molisch, “Channel measurements and path loss modeling for indoor THz communication,” in *Proc. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, Mar. 2020, pp. 1–5.
- [533] P. Tang et al., “Channel measurement and path loss modeling from 220 GHz to 330 GHz for 6G wireless communications,” *China Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 19–32, May 2021.
- [534] H. B. Eldeeb, S. M. Mana, V. Jungnickel, P. Hellwig, J. Hilt, and M. Uysal, “Distributed MIMO for Li-Fi: Channel measurements, ray tracing and throughput analysis,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 33, no. 16, pp. 916–919, Aug. 2021.
- [535] A.-L. Chen, H.-P. Wu, Y.-L. Wei, and H.-M. Tsai, “Time variation in vehicle-to-vehicle visible light communication channels,” in *Proc. 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Columbus, OH, USA, Dec. 2016, pp. 1–8.
- [536] J. Reyes-Guerrero and L. Mariscal, “5.8 GHz propagation of low-height wireless links in sea port scenario,” *Electronics Lett.*, vol. 50, no. 9, pp. 710–712, 2014.
- [537] K. Yang, T. Roste, F. Bekkadal, K. Husby, and O. Trandem, “Longdistance propagation measurements of mobile radio channel oversea at 2 GHz,” in *Proc. 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, San Francisco, CA, USA, Sep. 2011, pp. 1–5.
- [538] D. Matolak and R. Sun, “Air-ground channel measurements and modeling for UAS,” *IEEE Aerospace Electronic Syst. Mag.*, vol. 29, no. 11, pp. 30–35, Nov. 2014.
- [539] W. Khawaja, O. Ozdemir, F. Erden, I. Guvenc, and D. W. Matolak, “UWB air-to-ground propagation channel measurements and modeling using UAVs,” in *Proc. 2019 IEEE Aerospace Conference*, Washington, DC, USA, Dec. 2019, pp. 1–10.
- [540] H. I. Volos, C. R. Anderson, W. C. Headley, R. M. Buehrer, C. R. C. M. da Silva, and A. Nieto, “Preliminary UWB propagation measurements in an underground limestone mine,” in *Proc. IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington, DC, USA, Nov. 2007, pp. 3770–3774.
- [541] M. Ghaddar, L. Talbi, M. Nedil, I. Ben Mabrouk, and T. A. Denidni, “Mm-waves propagation

- measurements in underground mine using directional MIMO antennas,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 5, pp. 517–524, Apr. 2016.
- [542] Y. Zheng *et al.*, “Ultra-massive MIMO channel measurements at 5.3GHz and a general channel model,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp. 20–34, Jan. 2023.
- [543] W. Li, L. Liu, C. Tao, Y. Lu, J. Xiao, and P. Liu, “Channel measurements and angle estimation for massive MIMO systems in a stadium,” in *Proc. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, PyeongChang, Korea (South), Jul. 2015, pp. 105–108.
- [544] Y. Sun, C.-X. Wang, Y. Xu, L. Xin, J. Huang, and J. Huang, “Reconfigurable intelligent surface assisted MIMO channel measurements and characteristic analysis for 6G wireless communication systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, to be submitted.
- [545] A. Mudonhi, M. Lotti, A. Clemente, R. D’Errico, and C. Oestges, “RIS-enabled mmWave channel sounding based on electronically reconfigurable transmitarrays,” in *Proc. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Dusseldorf, Germany, Mar. 2021, pp. 1–5.
- [546] L. Zhang, C.-X. Wang, Z. Zhou, Y. Li, J. Huang, and C. Pan, “Channel measurements and characterization in industrial scenarios at 5.5 GHz,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, to be submitted.
- [547] X. Li, J. He, Z. Yu, G. Wang, and P. Zhu, “Integrated sensing and communication in 6G: the deterministic channel models for THz imaging,” in *Proc. 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Helsinki, Finland, Sep. 2021, pp. 1–6.
- [548] T. M. Pham, R. Bomfin, A. Nimr, A. N. Barreto, P. Sen, and G. Fettweis, “Joint communications and sensing experiments using mmWave platforms,” in *Proc. 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Lucca, Italy, Sep. 2021, pp. 501–505.
- [549] E. V. P. Anjos *et al.*, “FORMAT: A reconfigurable tile-based antenna array system for 5G and 6G millimeter-wave testbeds,” *IEEE Syst. J.*, pp. 1–12, 2022.
- [550] M. Chung *et al.*, “LuMaMi28: Real-time millimeter-wave massive MIMO systems with antenna selection,” *arXiv:2109.03273 [cs, eess, math]*, Sep. 2021.
- [551] Y. Cai *et al.*, “Demonstration of real-time photonics-assisted mm-Wave communication based on ka-band large-scale phased-array antenna and automatic beam tracking technique,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022*, San Diego, California, 2022, p. M3Z.12.
- [552] P. Sen, D. A. Pados, S. N. Batalama, E. Einarsson, J. P. Bird, and J. M. Jornet, “The TeraNova platform: An integrated testbed for ultrabroadband wireless communications at true terahertz frequencies,” *Comput. Netw.*, vol. 179, p. 107370, Oct. 2020.
- [553] X. Pei *et al.*, “RIS-aided wireless communications: Prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 12, pp. 8627–8640, Dec. 2021.
- [554] H. Zhang *et al.*, “Intelligent omni-surfaces for full-dimensional wireless communications:

Principles, technology, and implementation,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 2, pp. 39–45, Feb. 2022.

- [555] S. Zeng *et al.*, “Intelligent omni-surfaces: Reflection-refraction circuit model, full-dimensional beamforming, and system implementation,” Jul. 2022.
- [556] R. Fara, P. Ratajczak, D.-T. Phan-Huy, A. Ourir, M. Di Renzo, and J. de Rosny, “A prototype of reconfigurable intelligent surface with continuous control of the reflection phase,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 70–77, Feb. 2022.
- [557] A. Araghi *et al.*, “Reconfigurable intelligent surface (RIS) in the sub-6 ghz band: Design, implementation, and real-world demonstration,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 2646–2655, Jan. 2022.
- [558] M. M. Amri, N. M. Tran, and K. W. Choi, “Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: Adaptive beamforming and experimental validations,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147 442–147 457, Oct. 2021.
- [559] L. Dai *et al.*, “Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45 913–45 923, Mar. 2020.
- [560] Huawei is the first company to complete the preliminary verification of the 5G-Advanced sensory integration technology (in Chinese), Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1720764198273055037&wfr=spider&for=pc>
- [561] 6G ISAC with optical wireless, expanding the new boundary of wireless communication spectrum (in Chinese), Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.huawei.com/cn/technology-insights/future-technologies/6g-isac-ow>
- [562] O. Li *et al.*, “Integrated sensing and communication in 6G a prototype of high resolution THz sensing on portable device,” in *Proc. 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Porto, Portugal, Jun. 2021, pp. 544–549.
- [563] T. Xu, F. Liu, C. Masouros, and I. Darwazeh, “An experimental proof of concept for integrated sensing and communications waveform design,” *arXiv preprint arXiv:2202.04602*, 2022.
- [564] Radio Stripes: re-thinking mobile networks, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/radio-stripes>
- [565] J. Yuan, Y. Liu, Y. Hu, G. Xu, and J. C. Zhang, “Distributed FD-MIMO (D-FD-MIMO): From concept to field test,” in *Proc. 2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2022, pp. 86–89.
- [566] HUAWEI’s 5G Indoor Distributed Massive MIMO – “Best Solution Case” by ICT China 202, Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.huawei.com/en/news/2021/9/ubiquitous-gigabit-5g-indoor-dmm-wins-award>
- [567] G. Callebaut *et al.*, “Techtile—open 6g r&d testbed for communication, positioning, sensing, wpt and federated learning,” in *Proc. 2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Grenoble, France, 2022, pp. 417–422.
- [568] D. Wang, C. Zhang, Y. Du, J. Zhao, M. Jiang, and X. You, “Implementation of a cloud-based cell-free distributed massive MIMO system,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 8, pp. 61–67,



Aug. 2020.

- [569] The 2nd Global 6G Technology Conference showcases new ideas and new achievements in 6G technology research and development (in Chinese), Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available:<http://www.xinhuanet.com/tech/20220324/61c1911837a14a32b98f362e266ebabd/c.html>
- [570] H. Haas *et al.*, “Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi,” *J. Optical Commun. Networking*, vol. 12, no. 2, pp. A190–A203, Feb. 2020.
- [571] K. Matsuda *et al.*, “Field demonstration of real-time 14 Tb/s 220 m FSO transmission with class 1 eye-safe 9-aperture transmitter,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, San Francisco, CA, USA, Jun. 2021, pp. 1–2.
- [572] H. Ivanov, E. Leitgeb, T. Plank, and D. Kraus, “Evaluation of FSO technology as a candidate for reliable long-distance communication links for deep space applications,” in *Proc. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring)*, Rome, Italy, Jun. 2019, pp. 3441–3448.
- [573] H. Haas, S. Videv, S. Das, J. Fakidis, and H. Stewart, “Solar cell receiver free-space optical for 5G backhaul,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, San Diego, CA, USA, Mar. 2019, pp. 1–2.
- [574] J.-K. Lain, Z.-D. Yang, and T.-W. Xu, “Experimental DCO-OFDM optical camera communication systems with a commercial smartphone camera,” *IEEE Photon. J.*, vol. 11, no. 6, pp. 1–13, Dec. 2019.
- [575] N. Docomo *et al.*, “5G channel model for bands up to 100 GHz,” Tech. Report, Oct, Tech. Rep., 2016.
- [576] W. Roh *et al.*, “Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, Feb. 2014.
- [577] V. Raghavan *et al.*, “Millimeter-wave MIMO prototype: Measurements and experimental results,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 202–209, Jan. 2018.
- [578] M. Zhu, J. Zhang, J. Yu, and X. You, “Demonstration of record-high 352-Gbps terahertz wired transmission over hollow-core fiber at 325 GHz,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 65, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11432-021-3361-5.
- [579] C. Zhang, S. Jing, and X. You, “A joint baseband signal processing method for 5G communication systems,” China Patent CN201 710 382 422.3, Dec. 01, 2017.
- [580] C. Zhang, S. Jing, and X. You, “Design method of receiver of 5G communication system based on folding,” China Patent CN201 711 083 293.4, Apr. 13, 2018.
- [581] X. Zhang *et al.*, “Wide-coverage beam-steered 40-Gbit/s non-line-of-sight optical wireless connectivity for Industry 4.0,” *J. Light. Technol.*, vol. 38, no. 24, pp. 6801–6806, Dec. 2020.
- [582] W. Niu *et al.*, “Phosphor-free golden light LED array for 5.4-Gbps visible light communication using MIMO Tomlinson-Harashima precoding,” *J. Light. Technol.*, 2022.
- [583] M. Halper, Kyocera SLD Laser pumps up the LiFi speed, Accessed date: Aug. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.ledsmagazine.com/connected-ssl->

controls/article/14224008/kyocera-sld-laser-pumps-up-the-lifi-speed

- [584] A. Dochhan, J. Poliak, J. Surof, M. Richerzhagen, H. F. Kelemu, and R. M. Calvo, “13.16 Tbit/s free-space optical transmission over 10.45 km for geostationary satellite feeder-links,” in *Proc. 20th ITG-Symposium*, Leipzig, Germany, May 2019, pp. 1–3.
- [585] Y. Zhan, Y. Sun, Z. Shi, N. Yang, and L. Yang, “Demonstration of 100 Gbit/s real-time ultra high definition video transmission over free space optical communication links,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, San Francisco, CA, USA, Jun. 2021, pp. 1–3.
- [586] D. K. Pin Tan *et al.*, “Integrated sensing and communication in 6G: Motivations, use cases, requirements, challenges and future directions,” in *Proc. 2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S)*, Dresden, Germany, Feb. 2021, pp. 1–6.
- [587] Purple Mountain Laboratories, “TKu” 6G comprehensive verification platform (in Chinese), Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <http://cep.pmlabs.com.cn/#?ts=1657370535072>
- [588] H. Guo, J. Li, J. Liu, N. Tian, and N. Kato, “A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 53–87, 2022.
- [589] J. Huang, C.-X. Wang, R. Feng, J. Sun, W. Zhang, and Y. Yang, “Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 35, no. 7, pp. 1591–1605, Jul. 2017.
- [590] T. S. Rappaport *et al.*, “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [591] China Mobile, Science and Technology Week and Mobile Information Industry Innovation Conference (in Chinese), Accessed date: Jul. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.c114.com.cn/live/CMCCCT2022/>
- [592] Ultra-Low Power and High-Data Rate Short-Range Wireless Enables Fully Immersive 6G, Accessed date: Aug. 05, 2022. [Online]. Available: <https://www.huawei.com/en/technology-insights/future-technologies/6g-short-range-communications>
- [593] L. Yu and C.-X. Wang, “Prediction of wireless mmWave massive MIMO channel characteristics based on graph attention networks,” *IEICE Proceeding Series*, vol. 63, pp. SB1–5, 2020.
- [594] Z. Li *et al.*, “A GAN-GRU based space-time predictive channel model for 6G wireless communication systems,” *IEEE Trans. Commun.*, submitted for publication.
- [595] C. Huang *et al.*, “Artificial intelligence enabled radio propagation for communications—part I: Channel characterization and antenna-channel optimization,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 6, Jun. 2022.
- [596] C. Huang *et al.*, “Artificial intelligence enabled radio propagation for communications—part II: Scenario identification and channel modeling,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 6, Jun. 2022.
- [597] Y. Sun, C.-X. Wang, J. Huang, and J. Wang, “A 3D non-stationary channel model for 6G wireless systems employing intelligent reflecting surfaces with practical phase shifts,” *IEEE*

*Trans. Cognitive Commun. Netw.*, vol. 7, no. 2, pp. 496–510, Jun. 2021.

- [598] J. Huang et al., “Reconfigurable intelligent surfaces: Channel characterization and modeling,” *Proc. IEEE*, vol. 110, no. 9, pp. 1290–1311, Sep. 2022.
- [599] M. D. Migliore, “On electromagnetics and information theory,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 56, no. 10, pp. 3188–3200, Oct. 2008.
- [600] M. D. Migliore, “Blending electromagnetic and information theory in antenna synthesis,” in *Proc. 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Granada, Spain, Sep. 2019, pp. 1383–1386.
- [601] H. Bertrand M. and t. B. Stephan, “Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 3, pp. 389–399, Mar. 2003.
- [602] K. Jørg and T. Ragnar, “Iterative joint source-channel decoding of variable-length codes using residual source redundancy,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 919–929, May 2005.
- [603] Y. Jari and J. Markku, “Iterative joint detection, decoding, and channel estimation in turbo-coded MIMO-OFDM,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1784–1796, May 2009.
- [604] Q. Guo, L. Ping, and D. Huang, “A low-complexity iterative channel estimation and detection technique for doubly selective channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4340–4349, Aug. 2009.
- [605] C. Studer, S. Fateh, and D. Seethaler, “ASIC implementation of soft-input soft-output MIMO detection using MMSE parallel interference cancellation,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 7, pp. 1754–1765, Jul. 2011.
- [606] W.-C. Sun, W.-H. Wu, C.-H. Yang, and Y.-L. Ueng, “An iterative detection and decoding receiver for LDPC-coded MIMO systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 62, no. 10, pp. 2512–2522, Oct. 2015.
- [607] W.-C. Sun, Y.-C. Su, Y.-L. Ueng, and C.-H. Yang, “An LDPC-coded SCMA receiver with multi-user iterative detection and decoding,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 66, no. 9, pp. 3571–3584, Sep. 2019.
- [608] X. Deng et al., “Joint detection and decoding of polar-coded OFDM–IDMA systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 66, no. 10, pp. 4005–4017, Oct. 2019.
- [609] Y. Shen, W. Zhou, Y. Huang, Z. Zhang, X. You, and C. Zhang, “Fast iterative soft-output list decoding of polar codes,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 70, pp. 1361–1376, Feb. 2022.
- [610] K. Wang, H. Shen, W. Wu, and Z. Ding, “Joint detection and decoding in LDPC-based space-time coded MIMO-OFDM systems via linear programming,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 13, pp. 3411–3424, Jul. 2015.
- [611] A. Jalali and Z. Ding, “Joint detection and decoding of polar coded 5G control channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 2066–2078, Mar. 2020.
- [612] K. K. Parhi, *VLSI Digital Signal Processing Systems: Design and Implementation*. John Wiley & Sons, 2007.
- [613] Z. Zhong, W. J. Gross, Z. Zhang, X. You, and C. Zhang, “Polar compiler: Auto-generator of hardware architectures for polar encoders,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 67, no. 6, pp.

2091–2102, Jun. 2020.

- [614] C. Ji, Y. Shen, Z. Zhang, X. You, and C. Zhang, “Autogeneration of pipelined belief propagation polar decoders,” *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 28, no. 7, pp. 1703–1716, Jul. 2020.
- [615] L. Bai et al., “Channel modeling for satellite communication channels at Q-band in high latitude,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 137 691–137 703, Sep. 2019.
- [616] Z. Li, C.-X. Wang, J. Huang, and Y. Zheng, “A non-stationary GBSM for 6G LEO satellite communication systems,” in *Proc. IEEE/CIC ICC3’21*, Xiamen, China, Jul. 2021, pp. 493–498.
- [617] H. Chang et al., “A novel nonstationary 6G UAV-to-ground wireless channel model with 3-D arbitrary trajectory changes,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 8, no. 12, pp. 9865–9877, Jun. 2021.
- [618] J. Bian, C.-X. Wang, Y. Liu, J. Tian, J. Qiao, and X. Zheng, “3D nonstationary wideband UAV-to-ground MIMO channel models based on aeronautic random mobility model,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 11, pp. 11 154–11 168, Nov. 2021.
- [619] Y. Liu, C.-X. Wang, H. Chang, Y. He, and J. Bian, “A novel nonstationary 6G UAV channel model for maritime communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 10, pp. 2992–3005, Oct. 2021.
- [620] Y. He et al., “A novel 3D non-stationary maritime wireless channel model,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, no. 3, pp. 2102–2116, Mar. 2022.
- [621] X. Li, W. Feng, Y. Chen, C.-X. Wang, and N. Ge, “Maritime coverage enhancement using UAVs coordinated with hybrid satellite-terrestrial networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 4, pp. 2355–2369, Apr. 2020.
- [622] D. Liu, H. Wu, J. Ni, and X. Shen, “Efficient and anonymous authentication with succinct multi-subscription credential in SAGVN,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 2863–2873, Mar. 2022.
- [623] Y. Liu, L. Ni, and M. Peng, “A secure and efficient authentication protocol for satellite-terrestrial networks,” *IEEE Internet Thing J.*, early access, doi: 10.1109/JIOT.2022.3152900, 2022.
- [624] D. Li, S. Wu, J. Jiao, N. Zhang, and Q. Zhang, “Age-oriented transmission protocol design in space-air-ground integrated networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 5573–5585, Jul. 2022.
- [625] F. Lyu et al., “Service-oriented dynamic resource slicing and optimization for space-air-ground integrated vehicular networks,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 23, no. 7, pp. 7469–7483, Jul. 2022.
- [626] S. Yan, L. Qi, and M. Peng, “User access mode selection in satellite-aerial based emergency communication networks,” in *Proc. IEEE ICC wkshops ’18*, Kansas City, MO, USA, May 2018, pp. 1–6.
- [627] J. Liu, X. Du, J. Cui, M. Pan, and D. Wei, “Task-oriented intelligent networking architecture for the space–air–ground–aqua integrated network,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 7, no. 6, pp. 5345–5358, Jun. 2020.
- [628] M. Kashef, M. Ismail, M. Abdallah, K. A. Qaraqe, and E. Serpedin, “Energy efficient resource

- allocation for mixed RF/VLC heterogeneous wireless networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 883–893, Apr. 2016.
- [629] S. Kim, “Hybrid RF/VLC network spectrum allocation scheme using bargaining solutions,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20 019–20 028, Feb. 2022.
- [630] S. Aboagye, T. M. N. Ngatched, O. A. Dobre, and A. Ibrahim, “Joint access point assignment and power allocation in multi-tier hybrid RF/VLC hetnets,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 10, pp. 6329–6342, Oct. 2021.
- [631] R. Arshad and L. Lampe, “Stochastic geometry analysis of user mobility in RF/VLC hybrid networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 11, pp. 7404–7419, Nov. 2021.
- [632] G. Pan, J. Ye, and Z. Ding, “Secure hybrid VLC-RF systems with light energy harvesting,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 10, pp. 4348–4359, Oct. 2017.
- [633] 6GANA TG1, Network AI Concept and Terminology (in Chinese), Jan. 2022. [Online]. Available: <https://www.6g-ana.com/About.aspx?ClassID=29>
- [634] Y. He, J. Ren, G. Yu, and Y. Cai, “Optimizing the learning performance in mobile augmented reality systems with CNN,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5333–5344, Aug. 2020.
- [635] N. C. Thompson, K. Greenewald, K. Lee, and G. F. Manso, “The computational limits of deep learning,” *arXiv:2007.05558 [cs, LG]*, Jul. 2022.
- [636] D. C. Nguyen et al., “Enabling AI in future wireless networks: A data life cycle perspective,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 1, pp. 553–595, 1st Quart., 2021.
- [637] A. Zhang, M. L. Rahman, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen, and R. W. Heath, “Perceptive mobile networks: Cellular networks with radio vision via joint communication and radar sensing,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 20–30, Jun. 2021.
- [638] Q. Shi, L. Liu, S. Zhang, and S. Cui, “Device-free sensing in OFDM cellular network,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1838–1853, Jun. 2022.
- [639] J. Du, L. Zhao, J. Feng, and X. Chu, “Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with minmax fairness guarantee,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 4, pp. 1594–1608, Apr. 2018.
- [640] W. Zeng, J. Zhang, S. Chen, K. P. Peppas, and B. Ai, “Physical layer security over fluctuating two-ray fading channels,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 8949–8953, Sep. 2018.
- [641] L. Lv, Z. Ding, Q. Ni, and J. Chen, “Secure MISO-NOMA transmission with artificial noise,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 7, pp. 6700–6705, Jul. 2018.
- [642] S. Xu, S. Han, Y. Du, W. Meng, L. He, and C. Zhang, “An-aided secure beamforming design for correlated MISO wiretap channels,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 628–631, Apr. 2019.
- [643] F. Yan, Y. Liu, S. Han, and W. Meng, “A survey of physical layer security in space-air-ground communication and networks (in Chinese),” *Telecommun. Sci.*, vol. 36, no. 9, pp. 1–13, Aug. 2020.
- [644] J. Wu, “Grasp of “network security rebalancing strategy” : Mimicry defense (in Chinese),” *China Inf. Security*, pp. 46–50, Jun. 2018.

- [645] J. Zhang and R. Xu, “Research and application of secure multi-party computation (in Chinese),” *ZTE Technol. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 23–25, Feb. 2016.
- [646] K. Jiang, “Review of multi-party secure computing research (in Chinese),” *J. Inf. Security Research*, vol. 7, no. 12, pp. 1161–1165, Dec. 2021.
- [647] Development history and future direction of secure multi-party computing (in Chinese), Accessed: Apr. 25, 2022. [Online]. Available: <https://cloud.tencent.com/developer/news/436797>
- [648] L. Scheuvens, M. Simsek, A. Noll-Barreto, N. Franchi, and G. P. Fettweis, “Framework for adaptive controller design over wireless delayprone communication channels,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 49 726–49 737, Apr. 2019.
- [649] F. Boabang, A. Ebrahimzadeh, R. H. Glitho, H. Elbiaze, M. Maier, and F. Belqasmi, “A machine learning framework for handling delayed/lost packets in tactile Internet remote robotic surgery,” *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.*, vol. 18, no. 4, pp. 4829–4845, Dec. 2021.
- [650] S. Dixit, S. Mohan, R. Prasad, and H. Harada, “Multi-sensory human bond communication,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 2, pp. 18–18, Feb. 2019.
- [651] J. Chakareski, M. Khan, T. Ropitault, and S. Blandino, “6DOF virtual reality dataset and performance evaluation of millimeter wave vs. free-space-optical indoor communications systems for lifelike mobile vr streaming,” in *Proc. 2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2020, pp. 1051–1058.
- [652] M. Oparin and M. Eid, “Analysis of high-rate wireless links for tele-haptics applications,” in *Proc. 2017 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, Doha, United Arab Emirates, Sep. 2017, pp. 169–173.
- [653] J. Chakareski and S. Gupta, “Multi-connectivity and edge computing for ultra-low-latency lifelike virtual reality,” in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, London, United Kingdom, Jul. 2020, pp. 1–6.
- [654] J. Du, F. R. Yu, G. Lu, J. Wang, J. Jiang, and X. Chu, “MEC-assisted immersive VR video streaming over terahertz wireless networks: A deep reinforcement learning approach,” *IEEE Internet Thing J.*, vol. 7, no. 10, pp. 9517–9529, Oct. 2020.
- [655] F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, H. Ji, V. C. M. Leung, and X. Li, “An adaptive wireless virtual reality framework in future wireless networks: A distributed learning approach,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 8, pp. 8514–8528, Aug. 2020.
- [656] T. Sun, C. Zhou, X.-D. Duan, and et al., “Digital twin network (DTN): Concepts, architecture, and key technologies (in Chinese),” *Acta Automatica Sinica*, vol. 47, no. 3, pp. 569–582, Mar. 2021.
- [657] Y. Zhu, D. Chen, C. Zhou, L. Lu, and X. Duan, “A knowledge graph based construction method for digital twin network,” in *Proc. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, Beijing, China, Jul. 2021, pp. 362–365.
- [658] N. Luan, K. Xiong, Y. Zhang, R. He, G. Qu, and B. Ai, “6G: Typical applications, key technologies and challenges (in Chinese),” *Chinese J. Int. Things*, vol. 6, no. 1, pp. 29–43, Mar. 2022.

- [659] S. Zhu, K. Ota, and M. Dong, “Green AI for IIoT: Energy efficient intelligent edge computing for industrial internet of things,” *IEEE Trans. Green Commun. Network.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–88, Mar. 2022.
- [660] B. Mao, F. Tang, Y. Kawamoto, and N. Kato, “AI models for green communications towards 6G,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 210–247, 1st Quart., 2022.
- [661] J. Wang, C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, K.-C. Chen, and L. Hanzo, “Thirty years of machine learning: The road to pareto-optimal wireless networks,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 3, pp. 1472–1514, 3rd Quart., 2020.
- [662] J. Hu, K. Yang, G. Wen, and L. Hanzo, “Integrated data and energy communication network: A comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3169–3219, 4th Quart., 2018.