

通信-感知-计算融合：关键技术、挑战与未来趋势

刘壮¹, 吴宇赫², 陈雨然¹, 刘芮彤¹, 董晏宁¹, 赵军³

1. 东北财经大学 金融科技学院, 辽宁省大连市 116025

2. 东北财经大学 统计学院, 辽宁省大连市 116025

3. 大连理工大学 计算机学院, 辽宁省大连市 116024

+ 通信作者 E-mail: liuzhuang@dufe.edu.cn

摘要: 在构建未来高度融合的物理与数字世界中, 通信、感知与计算的深度整合已成为下一代智能网络的关键技术, 本文聚焦于通信-感知-计算融合 (ISCC) 技术, 系统剖析了其理论与应用价值。文章首先从技术演进和新兴需求出发, 明确了 ISCC 在提升系统智能化、降低时延和优化资源利用方面的关键作用, 尤其是在满足沉浸式扩展现实 (XR)、全息通信和自动驾驶等新兴业务需求中的必要性; 其次, 本文深入探讨了 ISCC 的核心技术体系, 包括无线感知、多模态感知、移动边缘计算和感知与通信的深度融合机制, 并揭示了其在数字孪生网络、算力网络和空天地一体化网络中的创新应用场景, 展示了其在高精度感知、高效数据处理和实时通信方面的优势; 进一步, 文章系统梳理了 ISCC 技术在实际部署中面临的多维度挑战, 如体系架构设计复杂性、空口协议优化难题、资源管控动态性、数据安全与隐私保护严峻性以及多源干扰管理复杂性, 并展望了未来研究方向, 强调了跨学科理论创新、标准化推进和系统性仿真验证的重要性。本文为 ISCC 技术在 6G 及未来通信网络中的发展提供了全面且深入的理论分析, 为相关领域的研究者与实践者提供了极具价值的参考框架, 旨在推动通信、感知与计算融合技术在构建下一代智能网络中的核心作用与发展路径。

关键词: 通信-感知-计算融合; 6G 移动网络; 无线感知技术; 多模态感知; 移动边缘计算

文献标志码: A **中图分类号:** TP***

Integration of Communication, Sensing and Computing: Key Technologies, Challenges, and Future Trends

Liu Zhuang¹⁺, Wu Yuhe², Chen Yuran¹, Liu Ruitong¹, Dong Yaning¹, Zhao Jun³

1. School of Fintech, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, Liaoning 116025, China

2. School of Statistics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, Liaoning 116025, China

3. School of Computer Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract: In the vision of a future where the physical and digital worlds are seamlessly connected, the integration of communication, sensing, and computing technologies is crucial to achieving a "freely connected physical-digital

基金项目: 2024 年辽宁省社会科学规划基金项目 (L24BJY010);

This work was supported by the 2024 Liaoning Province Social Science Planning Fund Project (L24BJY010);

收稿日期: 2024-12-16 **修回日期:** 2025-04-17

fusion world." This paper first analyzes the background and motivations behind the fusion of communication, sensing, and computing technologies, highlighting their potential in enhancing system intelligence, real-time performance, and efficiency. It then delves into the key technologies of this fusion, including wireless sensing, multimodal sensing, environmental sensing, mobile edge computing, and sensing-communication integration, offering a detailed analysis of their applications in intelligent transportation, digital twin networks, computing power networks, and integrated air-ground-space networks. Finally, the paper outlines the challenges faced by the fusion of communication, sensing, and computing technologies, including system architecture design, air interface protocol optimization, resource management strategies, data security and privacy protection, and multi-party interference management, providing guidance and reference for research and applications in the 6G era.

Key words: Communication-Sensing-Computing Integration; 6G Mobile Networks; Wireless Sensing Technology; Multimodal Sensing; Mobile Edge Computing

在构建未来自由连接的物理与数字世界的愿景中，通信、感知与计算构成了三大基础能力。随着 6G 移动蜂窝网络的发展，这三项技术不再是孤立的，而是通过“通感算”一体化的方式，原生地支持通信、感知和计算服务。这种融合不仅继承了传统通信的能力，还扩展了对物理世界的感知和计算能力，以实现物理世界与数字世界的高效互动与深度融合。这正是为了满足未来沉浸式扩展现实（Extended Reality，XR）、全息远程呈现、交互型虚拟数字人、协作机器人、无人驾驶、元宇宙等新兴业务的需求，进而实现“自由连接的物理数字融

合世界”的宏伟蓝图。

伴随着 6G 的不断发展，有关通感算一体化的研究也接连出现，为了更好地对各项技术应用进行总结，大量研究者对现有研究进行了带有不同侧重点的总结，如表 1 所示。本研究聚焦于 6G 通感算一体化的关键技术，深入探讨网络信息论在这一场景中的应用，并揭示了网络内部原生的通感算体系架构及其融合控制机制。通过实现多维资源的联合管控和性能优化，并确保数据安全，本研究旨在为推动 6G 技术的发展提供理论支持，同时为实际应用提供宝贵参考。通信、感知与计算融合体系的示

表 1 领域现有综述概况

Table1 Overview of existing reviews in the field							
文献	年份	ISC	ICC	ISAC	ISCC	研究范围	主要贡献
[1]	2019	✗	✗	✓	✗	ISAC 在智慧城市的应用	注重无线频谱资源的使用
[2]	2023	✗	✗	✓	✗	ISC 中的波形设计方法	总结了研究现状并从统一的性能度量 and 性能折中关系的角度对一体化波形的性能进行了探讨
[3]	2023	✗	✗	✓	✗	ISC 在无限跨域的应用研究	对无限跨域感知研究进行系统性梳理并对技术难点进行讨论分析
[4]	2023	✓	✓	✓	✓	联邦学习与 ISCC 的结合应用	总结了联邦学习在未来边缘智能系统中的研究趋势
[5]	2024	✗	✗	✗	✓	ISCC 在元宇宙场景中的应用	总结了元宇宙相关应用场景、未来挑战及解决方案
[6]	2024	✓	✓	✓	✓	ISCC 与安全在车联网中的应用	梳理感通算安的研究现状及局限性
[7]	2024	✓	✓	✓	✓	四种融合方式的关键技术与应用	强调了信号设计和网络资源管理
本研究	2025	✓	✓	✓	✓	对四种融合方式进行全面阐述	总结四方面关键技术与应用的基础上同时对产业标准化以及各个方面未来会遇到的诸多挑战进行详述

意图见图 1。



图 1 通感算融合体系交互图

Fig.1 Interaction diagram of ISCC

在此基础上, 本文深入分析了通信、感知与计算融合的概念、架构和关键技术, 并探讨了其在 6G 时代的重要性和应用前景。通信、感知和计算融合指的是在同一系统中同时具备通信、感知与计算三种功能, 使得它们在硬件资源、算法和数据层面紧密协作, 从而提升系统的智能性、实时性和效率。在这一融合体系中, 感知功能主要用于收集和感知环境中的信息; 计算功能为智能感知提供必需的处理能力; 通信功能则负责信息的交互, 促进智能感知与分布式计算的协同工作^[8]。通过这一技术, 6G 网络能够高效整合通信、感知与计算, 为智能应用提供强大的支撑^[9]。

1 准备工作

1.1 5G 与 6G 的对比

在技术进步和应用需求的双重驱动下, 民用通信系统正迅速发展。目前中国的 5G 网络规模与质量已居世界领先地位, 5G 移动电话用户占比接近一半^[10], 此外, 中国已率先建设了全球首个融合通信与智能的 6G 外场试验网, 实现了在 6G 关键应用场景下的通信性能大幅提升^[11]。

如表 2 所示, 与 5G 相比, 6G 在各项指标上都实现了显著提升^[12]: 峰值速率从 0.02Tb/s 提升至 ≥ 1 Tb/s, 用户体验速率从 0.1Gb/s 提升至 ≥ 1 Gb/s^[13], 移动速度从 500km/h 提升至 >1000 km/h, 连接密度从每平方公里 10^6 个设备提升至 10^7 个, 单位面积容量从 0.01Gbps/m² 提升至 1Gbps/m²^[13], 能效提升了 10-100 倍, 频谱效率提高了 5-10 倍, 时延从 1 毫秒

降低至 0.01-0.1 毫秒^[14]。

表 2 5G 性能与 6G 性能的对比

Table 2 Comparison of 5G and 6G performance

类型	5G	6G
峰值速度 (Tb/s)	0.02	≥ 1
用户体验速率 (Gb/s)	0.1	≥ 1
频谱效率	$1\times$	$5-10\times$
时延 (ms)	1	0.01-0.1
移动速度 (km/h)	500	>1000
连接密度 (个/km ²)	106	107
单位面积容量 (Gps/m ²)	0.01	1
能量效率	$1\times$	$10-100\times$

1.2 6G 性能指标介绍与场景应用

随着 6G 时代的到来, 移动通信网络的性能指标^[6]将实现质的飞跃, 以满足未来多样化的应用需求。本节将深入探讨 6G 网络的关键性能指标, 并分析其不同应用场景中的潜在影响。

指标 1 峰值速度

6G 网络的峰值速率预计将达到每秒 100 至 1000GB, 这一巨大的数据传输能力将为未来的应用场景, 如全息通信和高分辨率远程呈现, 提供坚实的基础。这一速率的提升不仅意味着更快的下载和上传速度, 还预示着全新的通信可能性。

指标 2 用户体验速率

用户体验速率是评估网络性能的另一个关键指标, 它代表用户在真实网络环境中所能达到的最高数据传输速率。在保障用户业务体验的前提下, 用户在网络覆盖区域内实现的传输速率取决于多个因素, 包括网络负荷、覆盖范围、用户数量和分布、终端位置以及具体应用类型。在 6G 时代, 用户体验速率有望达到 1Gb/s^[15], 这意味着运营商可以随时随地为用户提供千兆级的宽带服务, 显著提升了网络的整体服务质量和用户体验。

指标 3 频谱效率

频谱效率是指每小区或单位面积内, 每单位频谱提供的吞吐量^[16]。频谱效率的提升是 6G 网络的另一重要目标, 通过更高效的频谱利用, 6G 网络将在有限的频谱资源下提供更大的数据吞吐量, 这对于人口密集地区和高需求场景尤为重要。

指标 4 时延

时延是指在移动通信网络中,数据包从发送端发出,到接收端正确接收的时间延迟。超低时延是 6G 网络的标志性特征之一,6G 网络的时延将降至 0.1 至 1 毫秒,这对于要求极高实时性的工业互联网和自动驾驶等应用至关重要,能够确保机器间的即时响应和精确控制。

此外,6G 还引入了一些全新的能力指标^[17],具体如下:

指标 5 定位精度

定位精度是指定位测算值与实际值之间的误差,单位为 cm。6G 的定位精度为 1~10cm,即室内定位精度为 1cm,室外定位精度为 10cm,是 5G 的 10 倍。6G 网络的定位精度将达到厘米级别,无论是室内还是室外环境,这将为精确定位服务带来革命性的变化。这一精度的提升将使得室内导航、资产管理和紧急响应等服务变得更加高效和可靠。

指标 6 可持续性

可持续性是指通过大幅提高网络运营和系统部署的效率,以支撑 6G 网络的可持续发展。6G 网络的设计将充分考虑可持续性,通过提高能效和减少环境影响,支持网络的长期可持续发展。这不仅包括技术创新,还涉及到产品设计和网络运维的全生命周期管理。

指标 7 感知相关能力

感知相关能力是指将感知技术融入到通信系统中,为用户提供对物理事物的高分辨率感知、定位、成像、环境重构、姿态手势识别、健康监测、材料监测等能力。感知相关能力是实现 6G 时代愿景的重要基础。6G 将具有原生的感知能力,能够利用通信来实现目标的定位、检测、成像和识别等感知功能,获取周围物理环境信息,挖掘通信能力,增强用户体验,这些能力为用户带来更加丰富和直观的交互体验,同时也可以为智慧城市和物联网等应用提供了强大的支持。

1.3 通信-感知-计算融合 (ISCC) 在 6G 网络中的演进

第六代移动通信技术 (6G) 预示着一个全新的网络时代,其核心在于实现通信、感知与计算的无缝融合^[18]。6G 网络的设计旨在满足未来业务场景对超大容量、超低时延、高频谱效率、高能效以及精准广域感知的严苛要求,以支持智能交通系统、工业互联网等前沿技术的发展。为实现这一目标,6G 移动通信系统需要打破单一的通信维度,在链路和网络层面深度融合通信与感知技术,并通过与边缘计算和终端计算能力的智能协同,推动通信-感知-计算一体化 (Integrated Sensing, Computation and Communication, ISCC) 的全面整合。这一融合不仅能显著提升网络性能,还将实现智能协作,为用户提供更加丰富、高效的服务体验,超越传统通信的局限。

尽管在实际需求的推动下,ISCC 技术已取得显著进展,但深度融合的实现仍面临诸多挑战,包括基础理论的完善、体系结构的设计、关键技术的突破,以及通过仿真验证其实际性能的难题。如何构建高效可靠的融合架构、开发支持该架构的核心技术,并通过仿真测试进行验证,将是未来研究的关键方向。

2 关键技术

2.1 感知-计算融合

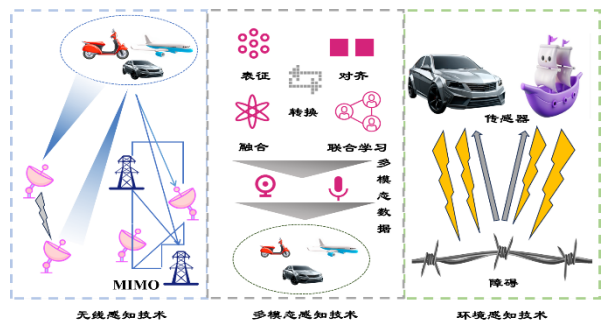


图 2 感知-计算融合三种核心技术

Fig.2 Three core techniques for ISC

随着通信技术的快速发展,感知信号的获取以及处理方式也在不断演进,感知计算一体化 (Integrated Sensing and Computing, ISC) 应运而生。

本节内容中,我们将对感知-计算融合的三种主要技术进行全面剖析,分别为无线感知技术、多模态感知技术与环境感知技术,如图2所示。

表3 感知-计算融合

Table 3 ISC

技术分类	技术名称	具体阐述
无线感知技术	无线感知技术	依赖于传输无线电波,通过分析反射信号特征而对目标进行识别 ^[19]
	合成孔径雷达	在移动过程中接收多个回波信号进行处理合成,获得高分辨率图像 ^{[20][21]}
	MIMO 雷达	使用多个天线提高通信容量和检测分辨率 ^[22]
	双基地雷达	发射器与接收器位置不同,提供更丰富的散射特性 ^{[21][22]}
	雷达信号处理	采用 FMCW 设计和自适应技术,如 GAN,优化雷达波形生成 ^[23-28]
多模态感知技术	多模态感知技术	处理来自不同模态的信息,提升系统性能 ^[29-31]
	表征	从不同模态的数据提取特征 ^{[32][33]}
	转换	通过一种模态生成另一模态的数据 ^[34]
	对齐	在多个模态之间寻找关联 ^[35]
	融合	整合不同模态数据以完成决策或预测任务 ^{[35][36]}
环境感知技术	联合学习	融合不同模态信息以提升模型表现 ^[36]
	地形重建	视觉利用传感器获得的影像对周围环境进行高精度的三维地形重建 ^[37]
	智能网联协同感知	对多传感器感知到的数据进行融合处理,从而增强感知能力,扩大感知区域 ^[38]
	信道知识地图技术	通过来自训练数据库和环境等多域信息,构建一个联系无线网络和真实环境的综合数据库 ^{[38][39]}

如表3所示,ISC不仅包含对各类感知技术的改进与应用,还需要将机器学习、深度学习等“计算”手段嵌入到感知过程之中。通过多模态数据处理、智能算法与资源调度等融合策略,感知系统在获取环境信息的同时能够进行更高层次的分析、预测与决策,从而在干扰抑制、实时监测、波形设计等多种场景中实现性能优化与功能拓展。

ISC 技术的第一种关键类型是无线感知技术。

该技术主要依赖于通过发射无线电波并分析其反射或散射特征,对目标进行识别和定位。在简单或相对空旷的环境中,单一的无线信号就能达到较好的感知效果。然而,当场景变得复杂或目标较多时,仅依靠单一信号模式往往难以满足高精度或多目标同时感知的需求。

为弥补无线感知技术的局限性,研究者们提出了多模态感知技术。相比于只利用无线信号,多模态感知整合视觉、听觉、压力、温度等多种传感器所获得的信息,通过对这些异构数据进行表达、转换与融合(如联合学习),能够在更加复杂或多变的环境下实现更高可靠度和鲁棒性的感知。此外,多模态感知还可以更准确地捕捉目标的多方面特征,使其在场景理解与智能决策方面具有更大优势。

为了进一步满足对实时性和大范围监测的需求,出现了第三种ISC技术——环境感知技术。此类技术依赖现有的通信网络和少量基础传感器来对环境状态进行检测,从而显著减少硬件成本并扩大覆盖范围。例如利用基站部署的低成本雷达或对多种交通工具位置与环境参数进行实时监测,可以在智能交通、智慧城市等领域发挥重要作用。

2.1.1 无线感知技术

无线感知技术,也称雷达感知技术,通过发射无线电波、采集、处理无线信号,获取特定对象或传播环境的状态与特征信息^[19]。随着大规模 MIMO、空间遥感、智慧交通等关键应用的发展,通信系统对于有效感知通信环境需求逐渐提高。于是,无线感知技术相关研究越发受到重视,从架构设计、信号处理方式等多方面进行改善,以提高系统性能。接下来将对该技术进行详述。

(1) 系统体制与改进雷达方案

在本节中,我们不同于传统文献仅局限于对静态雷达的介绍,而关注改进雷达的新方案,以适应复杂场景与多目标感知的需求。

(i) 静态雷达的概念与局限

静态雷达通常指发射机与接收机均固定部署在同一位置或固定区域,主要适用于目标或环境相对静止的场景。其优势在于架构简单、部署成本低,

但在探测范围、灵活性与多普勒估计等方面存在一定局限,难以满足多目标或大范围动态监测需求。因此,在现代化应用中,为提升系统性能与适用性,研究者们提出了多种改进雷达方案,本研究在后续对这部分内容进行详细阐述。

(ii) 合成孔径雷达 (SAR)

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种通过在移动过程中接收多个回波信号进行处理合成,从而获得高分辨率图像的系统^[20]。SAR具有非常好的环境条件的适应能力,能够全天候完成良好成像,但同时面对着对局部信息的过度关注而忽略了像素之间的非局部信息等问题^[21]。

(iii) 多输入多输出 (MIMO) 雷达

多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 雷达系统在发射端和接收端使用多个天线来提高无线通信的容量以及检测分辨率,使得MIMO具有更高的系统设计需求,尽管显著增加了硬件成本和复杂度^[22],但它可以设计出更灵活的波束形成,提升抗噪声能力。

(iv) 双基地雷达

双基地雷达的发射器与接收器并不在同一位置,刻意拉开了空间距离,这使其拥有了更丰富的散射特性,同时在军事作战时,也具备更精良的生存能力,大大降低了被侦测的风险,但同时也带来了同步困难,信号处理复杂等具有挑战性的问题。

(2) 信号处理

长久以来,雷达信号处理方式同样经历了由传统到接触先进技术的显著演变。在自动巡航领域,不再仅仅运用连续波雷达的经典方式,Rohling等人^[23]提出了通过采用新的FMCW设计的处理方案,利用三个不同天线波束的雷达传感器,在大大缩减测量时间的同时有效应对了虚假目标抑制问题。而新兴的信号处理方式更多地依赖于自适应技术^[24],例如通过生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN)进行处理,在生成具有低检测概率并能有效进行测距和感知的雷达波形时,GAN通过交替训练生成器G和判别器D来实现。其核心损失函数为:

$$\mathcal{L}_{\text{GAN}} = \mathbb{E}_{x \sim p_{\text{data}}(x)} [\ln D(x)] + \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [\ln (1 - D(G(z)))] \quad (1)$$

其中: x 表示来自真实数据分布的样本; z 表示采样自噪声或潜在空间的随机变量; $p_{\text{data}}(x)$ 表示真实数据的分布; $p_z(z)$ 表示噪声或潜在空间分布; G (Generator)为生成器,用于生成新的雷达波形; D (Discriminator)为判别器,用于区分真实波形与生成波形; $\mathbb{E}[\cdot]$ 为期望因子, $\ln$ 表示取底数为 e 的对数运算。

生成器负责生成新的雷达波形,试图欺骗判别器,而判别器则尝试区分真实波形和生成波形。通过这种对抗训练,生成器逐步学习生成难以检测的波形,从而降低雷达波形被探测到的概率。在评估生成的波形时,使用信号干扰噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SJNR) 作为关键指标^[25]:

$$\text{SJNR} = \frac{|y_s(t_0)|^2}{\mathbb{E}(|y_j(t_0)|^2)} = \frac{|\int_{-\infty}^{+\infty} R(f)H(f)S(f)e^{j2\pi f t_0} df|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |R(f)|^2 [2S_c(f)|S(f)|^2 + J(f) + S_n(f)] df} \quad (2)$$

其中: $y_s(t)$ 表示目标信号; $y_j(t)$ 表示干扰和噪声成分; $R(f)$ 为雷达信道(或系统)在频域上的响应函数; $H(f)$ 代表用于信道补偿或滤波操作的传递函数; $S(f)$ 表示原始发射信号在频域上的表达; $S_c(f)$ 为特定干扰模式下的补偿系数; $J(f)$ 为干扰分量; $S_n(f)$ 为噪声谱分量; t_0 是判定时刻或与目标回波有关的参考时间;分子项 $|\int \dots e^{j2\pi f t_0} df|^2$ 代表目标信号能量,分母项中的 $(\dots)$ 综合了干扰与噪声能量。

通过优化SJNR,可以提升雷达在复杂环境下的目标检测性能。同时,雷达波形生成还涉及功率频率分配策略。具体来说,状态 s_t 表示在时刻 t 时干扰信号的功率分配,动作则表示雷达信号的功率分配,优化雷达信号的频谱分布,生成抗干扰波形,进一步提升其探测能力^[26]。

$$s_t = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M] \quad (3)$$

$$a_t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M] \quad (4)$$

另外, Khobahi 等人^[27]研究出一种运用于雷达波形设计的深度学习方法, 通过结合数据驱动架构与模型驱动架构, 进一步优化了崭新方式在干扰抑制上的表现。

2.1.2 多模态感知技术

多模态指的是同一事物可以从多个角度进行展现, 而多模态感知则专注于处理来自不同模态的信息。这种方法能够获取更丰富的数据, 从而显著提升系统的性能。随着人工智能技术的快速发展, 多模态感知在图像处理和视听识别等领域表现出巨大的潜力, 多模态学习也逐渐成为研究热点。

Radford 等人^[28]在研究中提到: 跨模态学习则进一步利用一种模态的数据来增强另一种模态的学习效果, 例如通过文本描述提升图像识别的准确性。这种学习方式不仅提高了单一模态的性能, 还促进了模态之间的协同作用。此外, Li 等人^[29]研究的多模态预训练模型(如 BLIP)通过大规模多模态数据的预训练, 实现了跨模态的语义理解与生成。

根据 Balt 的研究^[30], 多模态机器学习涉及五大核心问题: 表征、转换、对齐、融合和联合学习:

(1) 表征

多模态表征是指从不同模态的数据提取出有效信息, 通常使用深度学习等方式来进行特征提取, 例如使用词嵌入模型表示文本特征, 基于卷积神经网络进行图形相关的特征提取工作^[31]。表征方法通常分为联合表征、多任务学习以及协调表征。联合表征指将不同模态数据嵌入到同一个空间中, 在此控件中实现信息互补, 具体表示为:

$$\mathbf{x}_m = f(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}_m$ 指多模态表征向量, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n$ 指单一模态表征向量, $f(x)$ 指计算函数, 通常为卷积神经网络、循环神经网络以及递归神经网络等方式。

而在多任务学习中, 利用不同模态之间的相关性进行协同训练, 常常利用于情感分析、命名识别等任务之中^{[32][33]}。协调表征指将不同模态感知数据分别映射到各自的空间中后, 结合一定的约束条件对表征向量进行结合, 即:

$$f(\mathbf{x}_n) \sim g(\mathbf{x}_m) \quad (6)$$

其中, 每个模态的数据通过各自的映射函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 投射到一个共享的多模态空间中。尽管这些模态在原始空间中是彼此独立的, 但通过引入相似性约束, 它们在映射后的表征空间中形成协同关系(用 $f(\mathbf{x}_n) \sim g(\mathbf{x}_m)$ 表示)。这一协同表征方式使得不同模态的数据能够在同一空间内相互关联, 从而提升多模态任务中的表现。

(2) 转换

多模态转换是指通过一种模态生成另一模态的数据。转换方法可以分为生成式方法与非生成式方法。生成式方法通过训练 AI 模型进行模态之间的转换, 将初始模态编码成向量形式, 利用解码器生成转换后的模态^[34]。非生成式方法往往利用对比学习, 通过对比学习来对数据进行有效表示。

(3) 对齐

多模态对齐是指在多个模态之间寻找关联, 从而使得信息互相关照, 主要分为显示对齐和隐式对齐方法。显示对齐方法通过采用动态时间归整(Dynamic Time Warping, DTW)等方式进行子组件之间的对齐, 隐式对齐方法则往往采用神经网络等深度学习模型进行对齐。

(4) 融合

多模态融合指将不同模态数据进行整合后, 完成决策或者预测任务。解决多模态融合所遇到的问题, 往往采用这三种方法: 早期融合、中期融合、和晚期融合^{[35][36]}。即分别在模型的输入层、卷积层或者全连接层、决策层对信息进行融合, 提高多模态数据分析的能力。

(5) 联合学习

联合学习指的是通过融合来自不同模态的信息, 通过某种方式结合不同的特性和结构, 使模型能够在不同模态间相互补充, 从而提升模型的整体表现。

2.1.3 环境感知技术

环境感知技术结合了多种传感器模态, 并与现今的数据处理算法集成, 以提供对环境的全面理解,

既是智能机器人等自主系统执行特定任务的必要前提,也是后续控制和决策的基础^[37]。该技术能够支持系统实时监测障碍物,并在复杂多变的环境中完成导航与运动规划,从而保障任务执行的安全性与准确性。

视觉感知是最常见的环境感知手段之一,涵盖物体检测、目标跟踪以及姿态估计等关键功能^[38]。其不仅应用于常规环境,还可进一步拓展到如水下、隧道和矿井等工况场景中,满足这些复杂甚至高危环境下自主作业的需求^[39]。例如,在水下环境中,视觉感知相较声学感知往往更具实时性与高分辨率优势,能够精细获取近距离环境信息,从而更好地辅助水下机器人开展自主运动与智能作业^[40]。而在挑战性更高的深空环境中,如探测车等航天器通过应用三维地形重建、障碍识别和地形分类等关键技术,融合感知与计算功能,以保障探测车在执行任务过程中的安全性和路径规划的精确性^{[40][41]}。

目前,学界与工业界正积极探索多传感器模式的融合路径,以提供更加全面与高鲁棒性的环境理解^{[42][43]}。Amigoni 等人^[42]通过传感器融合技术实现高度的情境感知,而这些感官输入会经过处理,在支持决策过程的同时增强自助系统的操作能力,确保在不确定条件下的精确度^[43]。更进一步地,环境感知技术也正朝着 ISCC 的方向发展。例如,信道知识地图技术可利用高分辨率空间无线信号分布信息,与通信系统深度融合进行资源优化定位,从而有效提升整体感知的精度与可靠性^[44]。

2.1.4 挑战

在产业化过程中,ISC 仍面临诸多严峻的挑战,特别是在标准化、系统集成以及资源优化方面。尽管无线感知技术、多模态感知技术和环境感知技术等领域的研究在实验室中取得了显著进展,但在实际应用中,技术的跨平台兼容性仍然是亟待解决的问题。不同厂商的感知设备、计算平台和数据传输协议的多样性,使得现有的系统缺乏统一的标准化框架,导致设备间的互操作性差,进一步阻碍了技术的规模化部署。例如,在智能交通或智慧城市等领域,感知和计算资源的联合应用必须依赖于多种

技术和设备的协同工作,但由于缺乏统一的技术标准,跨平台的设备和系统无法实现高效的数据共享和资源调度,限制了系统的性能和应用范围。

除了标准化问题,感知-计算融合技术的资源优化问题也给其产业化带来了巨大挑战。随着移动设备、传感器和计算节点的数量增加,如何在动态、多变的网络环境中对感知数据和计算资源进行高效调度,依然是技术应用中的难点。现有的资源调度和任务卸载方案,在面对大规模、多目标任务时,常常面临着计算复杂度过高和数据处理效率低下的问题。特别是在要求实时性和高精度的任务中,根据实时环境和任务需求动态分配计算资源,优化时延、能耗和计算精度的平衡,依然是技术发展的瓶颈。

2.2 通信-计算融合

在传统无线网络架构中,计算和通信功能通常被设计为两个独立的实体,各自执行其特定任务。但随着大数据和云计算技术的兴起,以及无线设备数量的激增,这种分离模式的局限性日益凸显。网络带宽的紧张和数据中心的过载问题,暴露出现有系统在资源分配和处理效率方面的不足,难以满足现代应用对于复杂性和实时性的高标准。

为了应对这些挑战,迫切需要一种新的设计范式,将通信与计算功能紧密结合,形成集成通信与计算(ICC)的新型网络架构。具体技术如表4所展现的。

在 ICC 模型中,通信网络不再仅仅是数据传输的通道,而是通过集成的计算资源,积极参与到数据处理和优化的过程中,这种融合不仅提升了网络的效率,还显著降低了延迟,为实时应用提供了强有力的支持。本节将深入探讨 ICC 技术的研究进展,详细阐述其高效设计的原理,并特别聚焦于移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)这一在 ICC 领域中至关重要的技术;MEC 通过将计算任务下沉到网络边缘,使得数据处理更接近数据源,从而减少了数据传输的延迟,提高了服务的响应速度,为实现智能网络服务提供了新的可能性,通过对 ICC 和 MEC 技术的深入分析,揭示其在推动未来通信网络发展中的重要作用。

表4 通信-计算融合

Table 4 ICC

技术分类	技术名称	具体阐述
移动边缘计算	资源分配	联合通信和计算资源分配, 优化时延和能量消耗 ^{[45][46]}
	协作计算	通过优化计算任务卸载等方式提高系统计算能力 ^[47-51]
	安全防护	保护 MEC 在隐私和数据安全方面的威胁 ^[52-60]
通信计算融合	集成通信与计算 (ICC)	通信网络集成计算资源, 数据处理和优化
	移动边缘计算 (MEC)	将计算任务下沉到网络边缘, 减少数据传输延迟, 提高服务响应速度 ^[61-63]

2.2.1 移动边缘计算

近年来, 移动边缘计算因微芯片算力提升应运而生, MEC 是将计算资源、存储资源和网络资源从传统的中心云端向网络边缘下沉的分布式计算架构, 通过将处理数据的位置集中于数据源附近, 从而减少数据回传云端的带宽占用, 同时利于移动设备将计算任务卸载至边缘服务器上, 进一步降低延迟, 增强对实时应用的支持。

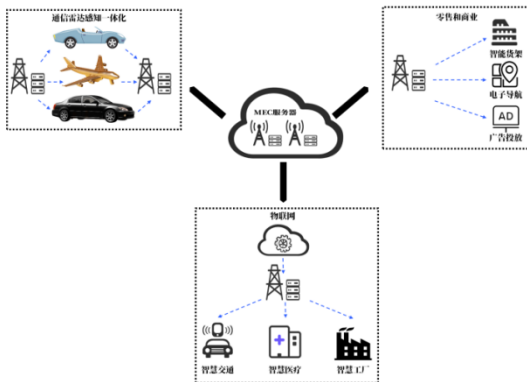


图3 移动边缘计算应用场景

Fig.3 Application Scenarios of MEC

如图3所示, 目前, MEC的技术相关设计集中于以下几个方面:

(1) 资源分配

随着设备数量的不断增加, 即使边缘服务器拥有较为良好的计算能力, 但也很难满足用户的多样

化需求。因此联合通信和计算的资源分配策略显得尤为重要, 合理利用各项资源, 优化时延性以及能量消耗等性能指标。近年来, 基于机器学习的资源分配方法得到了广泛应用。为应对动态多用户 MEC 系统的资源分配问题, Li 等人^[45]进一步采用深度强化学习框架, 通过无线信道向 MEC 服务器进行计算卸载, 同时考虑了长期目标, 实现任务开销的减轻。同样, Yan 等人^[46]提出了基于贝叶斯优化的资源分配方案, 利用多臂老虎机模型进行任务卸载决策, 优化资源分配变量, 在带宽受限的情况下也能减少能耗。

为进一步优化时延方面的问题, Fang 等人^[47]选择聚焦于非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 与 MEC 的结合, 通过将延迟最小化问题转化为准凸问题, 提出了一种二分搜索算法进行求解, 成功降低了用户间的任务延迟, 同时提高了频谱利用效率。Wu 等人^[48]从博弈论的角度分析了基于 QL 算法的收敛行为, 提出了结合深度 Q 网络与传统优化算法的混合方法, 有效减少系统延迟。Mahmud 等人^[49]开发了一种面向体验质量 (Quality of Experience, QoE) 的资源分配策略, 通过整数线性规划模型实现服务提供商的利润最大化, 同时确保用户的服务质量, 优化任务部署的同时, 在不增加用户能耗的前提下减少了任务的总处理时间。

(2) 协作计算

MEC 中的移动设备通常通过网络边缘卸载资源, 以满足低延迟需求, 并最小化系统总成本。为解决计算资源高功耗等问题, 协作计算成为一种前景广阔的解决方案, 旨在通过优化计算任务卸载等方式提高系统计算能力。

Pan 等人^[50]提出了一种合作任务计算框架, 开发了三种算法: 基于整数约束松弛的迭代算法、启发式匹配算法与分散式算法, 在优化卸载决策和计算频率的同时最小化系统总成本。为使在车载网络场景下的 MEC 服务器能够最小化任务完成的延迟, Dai 等人^[51]通过概率计算卸载 (PCO) 算法使 MEC 服务器能够基于分配概率进行独立调度, 最终验证

应用于多种场景的优越性。与此同时, Wang 等人^[52]提出了一种通过数据压缩减少能耗的方法, 通过优化数据的压缩率来最小化移动设备的总能耗, 同时满足延迟约束。此外, Wan 等人^[53]提出了考虑车联网中的计算方法, 通过多目标优化解决了边缘节点过载的问题, 有效提高任务执行效率。

(3) 安全防护

多接入边缘计算是云计算的扩展, 旨在为靠近终端用户的网络边缘提供计算、存储和网络能力。但随着技术的进步, MEC 在隐私保护方面面临着大量高度复杂的威胁, 如何有效与新兴技术结合也成为如今的研究难题。

物联网 (Internet of Things, IoT) 的快速发展为智慧城市提供了强大推动力, 但也带来了严峻的安全和隐私挑战。未加密的物联网设备和僵尸网络的涌现为攻击者提供了大规模攻击的机会, 为此 Abou El Houda 等人^[54]利用联邦学习来协作多个 MEC 域, 有效减轻物联网攻击。Hao 等人^[55]进一步提出了基于区块链和深度强化学习 (BC-DRL) 的优化框架, 通过设计信誉权益证明 (Proof of Stake based on Reputation, RPoS) 共识协议提高了安全性, 并防止了数据篡改。此外, Li 等人^[56]设计了一种新颖的安全框架, 通过 OpenID Connect (OIDC) 认证和位图授权机制, 显著降低了认证延迟, 同时成功预防潜在威胁。Wang 等人^[57]则通过结合物理层安全技术和混合连续干扰消除解码, 带来了基于强化学习的 NOMA-MEC 系统, 显著地优化了系统安全性能。

2.2.2 挑战

在现有的网络架构中, 虽然通信和计算的标准已取得一定进展, 但 ICC 的复杂性要求新的、跨层级和跨领域的标准化体系。目前, 全球范围内缺乏统一的技术标准来有效支持计算与通信资源的协同调度与优化, 尤其是在多用户、大规模动态环境下。现有的标准多局限于单一技术领域, 缺乏对通信网络和计算资源的综合考虑。这种技术分割使得 ICC 在不同平台间的互操作性和设备兼容性问题日益突出, 特别是在跨行业应用中, 诸如智能制造、自动驾驶等领域, 资源调度和数据处理的标准化需

求更为迫切。然而, 现有标准在这方面的缺失限制了技术的广泛应用, 且现有的标准并未有效支持多样化应用场景中的性能优化需求, 例如在不同带宽和计算能力条件下, 如何保持系统的低延迟、高可靠性和低能耗。

除了资源调度与互操作性问题, 通信与计算融合所面临的挑战还包括数据安全与隐私保护的标准化缺口。由于边缘计算的兴起, 数据处理更加接近终端用户, 增加了数据泄露和政击的风险。目前, 针对边缘计算和分布式数据处理的安全标准化仍不完善, 尤其是在多个设备、平台和服务之间进行大规模数据交换时, 现有的安全协议和隐私保护措施无法充分满足实时性要求和跨域安全需求。此外, 现有的安全标准未能充分考虑边缘计算环境中的异构网络和多种接入方式带来的额外安全威胁。在此背景下, 如何通过标准化框架实现端到端的类据保护, 确保计算和通信的安全性和可靠性, 成为了 ICC 产业化过程中不可忽视的重要问题。

2.3 感知-通信融合

在数字化与智能化交织的时代, 通信与感知技术成为推动各领域发展的关键。感知技术分为有线和无线两大类, 它们与通信技术的融合正重塑世界。有线感知技术通过传感器和有线线路精准传输数据, 在工业自动化和智能建筑等领域展现显著成效。而无线感知技术则突破线缆限制, 凭借便捷部署和灵活组网能力, 结合 5G、6G 网络实现数据高速传输。它们在智能家居、智能物流、车联网等场景中发挥重要作用, 推动各行业创新发展。

2.3.1 通信结合无线感知技术

通信结合无线感知技术主要利用无线信号进行信息的传输和环境的感知 (如图 4 所示)。在通信方面, 无线信号用于携带和传递数据; 在感知方面, 无线信号则用于探测和识别环境中的目标或物体。通过特定的信号处理算法, 可以从接收到的无线信号中提取出有关环境的信息。本小结将通信结合无线感知技术分为 9 大类别, 如表 5 所示, 由于新兴雷达通信框架的搭建、机器学习与深度学习等方法的结合为通信-感知技术发展提供了更高效的

前进路线,我们将对起推进作用的框架以及方案进行详细讨论。



图4 感知-通信融合核心技术

Fig.4 Core techniques for ISAC

表5 通信结合无线感知技术的方式

Table 5 The way of integrating communication with wireless sensing technology

技术分类	技术名称	具体阐述
频谱管理与共享技术	新兴雷达通信技术	实现雷达与通信系统在频谱集成时的无干扰运行 ^[60]
	频谱共享技术	允许不同的系统或服务在相同或重叠的频谱资源上工作
信号处理技术	波束赋形技术	调整天线阵列的权重,增强通信链路的信号质量,提高定向感知能力
	基于压缩感知的技术	降低感知系统的采样需求和数据处理复杂度
复用技术	时分复用与频分复用	时分复用通过在不同时间段分配雷达和通信任务避免干扰,频分复用则在不同频段上分配任务
	码分复用技术	利用伪随机码对雷达和通信数据进行正交化处理,实现雷达通信一体化
	空分复用技术	在不同的空域分别实现雷达和通信功能,提供波形设计的灵活性
优化与设计技术	跨层优化与设计	协调不同层次的参数和策略,实现通信与感知功能的整体优化
	机器学习与深度学习	感知通信性能,自适应调整系统参数,提高感知精度和通信效率 ^[64-67]

(1) 雷达通信框架的搭建

为了实现雷达与通信系统在频谱集成时的无干扰运行,雷达和通信频谱共存(Radar-Communication Coexistence, RCC)框架应运而生,旨在确保两者在同一频段内共存的同时有效抑制

干扰^[58]。近年来,针对RCC系统的研究主要聚焦于MIMO通信系统与雷达共存的方案设计,Li等人^[59]开创性地考虑了矩阵补全MIMO雷达与通信系统的共存,扩大零空间的同时不会对雷达系统造成干扰。与此同时,Li等人^[60]的研究提出了MIMO通信系统与基于矩阵补全的MIMO雷达共存的协作方案,联合设计雷达和通信的发射预编码矩阵,最大化雷达的信噪比。而Liu等人^[61]将RIS引入RCC系统之中,通过智能操控传播环境,增强期望信号并且抑制不期望的干扰信号,有效优化雷达发射波束成形和通信信号的反射系数。而Elbir等人^[62]则提出了利用IRS辅助RCC的经典场景,不凡能扩展系统覆盖范围,也能提升系统的参数估计性能,在一定幅度上为雷达通信任务提供了更多的自由度。此外,Khawar等人^[63]通过分析零空间投射波形的目标检测性能,进一步证明了该方法在多基站场景中的优越性。

(2) 机器学习与深度学习

机器学习方法的应用使得认知无线电、NGWN等技术得到提升,Wang等人^[64]提出将机器学习算法应用于认知无线电中,利用自动化的参数估计与交互式决策,解决了服务异构性问题。为了进一步利用动态无线资源,Zhou等人^[65]研究结合机器学习技术,进行频谱感知与自适应频谱接入,达到较好效果。与此同时,Wang等人^[66]利用支持向量机等算法对于处理后的纯净信号进行目标识别,减小计算复杂度,也能够对感知性能起到优化作用。相比之下,深度学习技术的引入为通信感知一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)提供了更高层次的感知能力。Huang等人^[67]提出了一种基于深度学习的无线信道建模框架,利用径向基函数神经网络(RBF-NN)对无线信道的统计特性进行预测,从而大幅度提高了过程精度。此外,Cao等人^[68]使用双向递归神经网络(Bi-RNN)学习分段CSI数据的上下文信息,提出了一种通过WiFi信号的无接触体动识别(CBMR)方法,有效减少了延迟。

(3) 其他技术

在频谱共享技术与多种复用技术的创新应用

中,多位研究者提出了突破性的方案,显著提升了通信系统的性能和数据传输效率。Jiaqi Li 等人^[69]提出了一种自适应波束赋形保护方案,在波束赋形技术做出贡献,通过建模雷达测高仪系统、5G 基站、通信信道和传播环境,准确模拟了雷达测高仪接收到的信号,并验证了该方案能够准确测量飞机的高度。E. Rodriguez-Orduna 等人^[70]使用光子灯笼支持的空分复用技术结合相干调制,显著提升了光纤系统的容量和 RF 信号传输效率,增强了通信系统性能。除此之外, Ruofan Wang 等人^[71]用了一种基于电光强度调制器 (EOIM) 和光纤延时线 (OFDL) 的多通道光纤布拉格光栅 (FBG) 频分复用传感方案,该方案融合了时分复用 (TDM)、空分复用 (SDM) 和频分复用 (FDM) 技术,形成了一种混合复用解决方案。R Wang, X Zhang 等人^[72]基于码分复用 (CDM) 的高性能音频流可逆数据隐藏 (RDH) 方案,该方案通过正交扩频向量将大量私有数据嵌入音频流中而不相互干扰,实现了私有数据和原始音频流的完全恢复,并显著提高了数据嵌入容量和音频流的感知质量。此外,在频谱共享、基于压缩感知技术等方面也有许多重大突破。

2.3.2 通信结合有线感知技术

传感器作为数据采集设备,通过感知环境变化或物理量(如温度、压力、湿度、光强等),将其转换为可测量的电信号或数字信号。这些信号需要通过通信接口传输到处理器或数据中心进行进一步处理和分析。通信接口可以是有线或无线的,具体选择取决于应用场景和需求。

连接方面,串口(如 RS-232、RS-485、RS-422 等)是传感器与处理器之间常见的有线连接方式,传感器通过这些串口发送数据至处理器进行接收和处理。对于需要更高速度的数据传输或远距离通信的应用场景,网口则成为理想选择,传感器通过网口发送数据包,处理器负责接收并解析。此外,USB、I2C、SPI 等接口也常用于传感器与处理器之间的连接,具体采用哪种接口取决于传感器的类型及其所支持的接口标准。例如,基于光电传感技术和市场调研,刘家亮等人^[73]针对胡萝卜播种机,提

出了红外辐射单元交叉堆叠的布置方案,以提高小粒径种子的检测精度。利用堆叠传感器的高精度播种监测系统通过无线通信模块将数据发送至显示单元,并在漏播率较高时触发系统报警,从而实现播种机运行状态的实时监控。张伟等人^[74]通过光纤-无线融合技术,解决城市密闭空间的监测难题,并提出一种创新的能量与信号同步传输方案。该方案集成了长距离光纤传输、高效光电转换以及磁共振无线电能传输等关键技术。这些技术的综合应用为光纤通信与无线传感技术的融合提供了新视角,为城市基础设施监测等领域带来了创新支持。

2.3.3 挑战

通信-感知融合技术,作为一种前沿技术,正逐步在车联网、智能工厂等多个领域展现其巨大潜力。然而,这一技术的实施,特别是在车联网等高动态环境中,面临着多方面的挑战。

首先,定向通信的应用是一个显著的挑战。在车联网中,为了实现高效的信息传输,发射机需要准确获取接收机的方位信息^[75],并具备持续跟踪其方位的能力。这对于高动态的智能车联网来说,对波束控制能力提出了极高的要求^[76]。此外,定向通信还需要符合空间正交分布特性的波束成形方案,或者为非正交波束成形方案提供有效的干扰消除策略,以确保通信的稳定性和可靠性^[77]。其次,波形设计的灵活性和可重构性也是一大难题^[78]。由于通信-感知融合技术的应用场景多样,因此一体化波形必须能够适应不同的环境和需求。例如,如何让 OFDM 这一通信系统的主流调制技术与现有通信系统更加兼容,是一体化波形设计需要考虑的重要问题。针对高动态的移动场景,可能需要引入如 OTFS 等新型调制技术,以进一步提高通信的稳定性和效率。再者,太赫兹频段的一体化波形设计同样面临挑战。虽然太赫兹频段具有超大带宽、波长小、集成尺寸小、时延超低、数据传输速率超高等诸多优势,但其超窄的波束成形也给波束对准带来了极大的难度。

未来的研究方向将围绕这些挑战展开,包括基础理论的研究、信道模型的建立、一体化信号波形

的优化、数据处理算法的创新、联合定位和感知设计的探索,以及感知辅助通信技术的发展等^[79]。这些研究将有助于进一步提高通信-感知融合的精度和效率,推动这一技术在更多领域的应用和发展。

2.4 通信-感知-计算融合

2.4.1 ISCC 技术

表 6 感知、通信和计算融合

Table6 ISCC

技术分类	技术名称	具体阐述
通信感知 计算融合	通信-感知- 计算融合 (ISCC)	将感知、通信和计算功能综合到单一平台,优化网络性能并支持复杂应用场景 ^[80-82]
信号设计	单信号 设计	通过优化信号参数提高特定功能的性能,如无线通信和自动驾驶车辆雷达系统 ^{[83][84]}
	双信号 设计	将通信和感知功能融合于单一信号中,优化资源利用并简化系统架构 ^{[85][86]}
	三信号 设计	整合通信、感知功能和边缘计算能力,允许在信号传递过程中进行数据预处理和分析 ^[87-89]
一体化技 术	跨层一体 化设计	涉及从物理层到应用层的各个网络层次,优化整个通信系统的性能 ^{[90][91]}
	硬件和软 件集成	在单一设备中集成多个功能模块和处理单元,实现高效的数据处理和资源管理 ^{[92][93]}
多维信息 数据处理 与资源管 理	数据处理 技术	使用高效的数据处理技术和算法处理来自多种源的信息 ^[94-96]
	资源管理 策略	确保通信、感知和计算资源最优化利用,处理带宽、功率分配问题 ^[97]
智能网络 优化与自 适应控制 技术	自适应网 络优化	通过实时监测网络状态和性能,动态调整网络资源和配置 ^{[98][99]}
	智能故障 预测与 管理	利用数据分析和模式识别技术,实时监控和诊断潜在的故障点 ^{[100][101]}
	资源动态 分配和 调度	依托 ISCC 的高度集成性,快速响应并优化资源分配 ^[102]
一体化网 络架构	一体化网 络架构的 层次性	实现高度数字化、智能化和绿色化社会的关键架构 ^[103]

ISCC (Integrated Sensing, Communication, and Computing) 技术是一种将感知、通信和计算功能综

合到单一平台的先进技术框架,旨在优化网络性能并支持如智能城市、自动驾驶、智能制造和物联网等复杂应用场景,例如表 6 所呈现的。根据陆海涛等^[80]的研究,感知功能通过各种传感器收集关键数据,通信功能确保数据的高效传输,而计算功能则在网络的边缘进行,实时处理和分析数据以支持智能决策。

尽管 ISCC 提供了显著的优势,但其实施面临多重挑战。Singh^[81]指出,资源管理的复杂性、系统集成的高效性、数据的安全与隐私保护,以及技术的标准化和系统兼容性都是当前的主要难题。未来的发展方向,如 Khan^[82]所述,将聚焦于算法优化、系统可扩展性的增强、人工智能技术的深度集成,以及能效的优化,以应对设备数量增加和网络需求日益复杂化的挑战。这些研究的进展推动了 ISCC 技术的成熟,也为智能应用的广泛实施提供了坚实的技术支持。

2.4.2 信号设计

(1) 单信号设计

单信号设计专注于通过优化信号的各个参数来提高特定功能的性能。这种设计广泛应用于传统的无线通信和最近的自动驾驶车辆雷达系统。Sihag^[83]指出,在无线通信中,通过调整调制和编码技术可以显著增强信号的抗干扰能力和传输效率。此外,Lei^[84]通过他们的研究表明,在无人驾驶车辆的雷达系统中,单信号设计优化了雷达波形,改善了目标检测的准确性和距离分辨率。

(2) 双信号设计

双信号设计将通信和感知功能融合于单一信号中,此设计不仅优化了资源利用,同时也简化了系统架构。Liu^[85]研究指出,双信号设计通过共享频谱资源,显著提高了频谱利用率,并减少了设备的能耗。进一步地,Pal^[86]探讨了双信号系统在城市交通管理中的应用,通过集成的通信与感知信号,提高了系统的响应速度和安全性能。该设计理念已被应用于智能交通系统,通过实时的车辆通信与环境感知,有效指导交通流动与安全管理。

(3) 三信号设计

三信号设计是信号设计领域的一次重大创新,它不仅整合了通信与感知功能,还引入了边缘计算能力,允许在信号传递过程中进行数据预处理和分析。曾勇等^[87]的研究表明,三信号设计在实时视频监控系统中通过即时处理监控数据,显著减少了数据传输量和响应时间。此外,谢泽铖等人^[88]探讨了三信号设计在工业物联网中的应用,指出该技术能有效支持大规模设备间的即时数据交换与处理,优化了整个生产流程的效率和自动化水平。

三信号设计是信号设计领域的一次重大创新,它不仅整合了通信与感知功能,还引入了边缘计算能力,允许在信号传递过程中进行数据预处理和分析。蒋梦浩^[89]的研究表明,三信号设计在实时视频监控系统中通过即时处理监控数据,显著减少了数据传输量和响应时间。

2.4.3 一体化技术

(1) 跨层一体化设计

跨层一体化设计是一个全面的方法,涉及从物理层到应用层的各个网络层次,旨在优化和增强整个通信系统的性能。这种设计方法允许各层之间的信息和资源共享,以及策略协同,从而提高网络的灵活性和效率。王莹等^[90]提出,跨层设计可以通过动态调整物理层的传输策略来应对应用层的服务质量需求,有效解决传统分层架构中层间隔离带来的资源利用不足问题。进一步地,刁兆坤^[91]的研究中指出,跨层设计不仅优化了数据流的管理,还通过预测网络状态的变化,动态调整网络协议,显著提高了网络的自适应能力和性能。这种全面的设计策略已在无线传感网络和移动通信网络中得到应用,通过优化信号处理、网络路由和数据安全策略,显著提升了网络的整体性能和可靠性。

(2) 硬件和软件集成

硬件和软件集成是实现通信系统一体化功能的关键技术,涉及将多个功能模块和处理单元在单一设备中集成,以实现高效的数据处理和资源管理。这种集成不仅优化了设备的性能,还减少了系统的能耗和成本。王晓云等人^[92]研究表明,通过在一个芯片上集成传感器、处理器和通信模块,可以显著

降低设备的响应时间和功耗,同时提高数据处理的效率。此外,缪德山^[93]的研究强调了硬件与软件深度集成在智能手机和智能车辆中的应用,通过优化操作系统和中间件支持,使设备能更好地处理复杂的多任务和高速数据流。然而,这种集成技术也面临着诸多挑战,如硬件的可扩展性和软件的兼容性问题,以及维护系统安全性和稳定性的需求。克服这些挑战需要持续的技术创新和系统优化,以确保硬件和软件的有效集成,满足未来通信网络的发展需求。

2.4.4 多维信息数据处理与资源管理

(1) 数据处理技术

在 6G 网络中,处理来自多种源的信息是一个核心挑战,这要求使用高效的数据处理技术和算法。这些技术需要能够处理大量的数据,并从中提取有用信息,以支持智能服务和应用。黄宇红等人^[94]提出了一种基于机器学习的数据融合方法,该方法能够整合来自不同传感器和设备的信息,提高了数据处理的准确性和效率。此外,瞿重希^[95]研究了在 6G 环境中使用分布式边缘计算处理大规模数据流的策略,该策略通过在网络边缘进行初步数据处理,显著减少了数据传输量和网络延迟。进一步地,李静等人^[96]开发了一种新的数据压缩算法,该算法在不损失数据质量的前提下,有效减少了数据存储和传输的资源消耗。这些技术的发展和应用,为 6G 网络中的数据处理提供了强大的支持,使网络能够高效地处理和利用海量的多源信息。

(2) 资源管理策略

在 6G 网络中,高效的资源管理策略是确保通信、感知和计算资源最优化利用的关键。资源管理不仅需要处理传统的带宽和功率分配问题,还要考虑如何分配处理能力和存储资源。索士强等人^[97]提出了一种基于人工智能的资源管理框架,该框架使用深度学习算法预测网络负载和用户需求,动态调整资源分配,以提高网络的整体性能和能效。此外,赵健探讨了在多接入边缘计算环境下的资源管理策略,该策略通过协调中心和边缘节点的计算资源,优化了数据处理任务的分配,降低了系统的响应时

间。这些管理策略的实施，不仅提高了资源的利用效率，还确保了 6G 网络能够支持更多高要求的应用，如虚拟现实和自动驾驶，从而推动了整个网络系统的性能向更高水平的发展。

2.4.5 智能网络优化与自适应控制技术

（1）自适应网络优化

随着 ISCC 技术在 6G 环境下的不断应用，网络自我优化能力成为提升性能的关键。智能网络优化技术通过实时监测网络状态和性能，动态调整网络资源和配置，以应对不断变化的网络需求和环境条件。承楠等人^[98]的研究展示了基于机器学习的网络优化算法能够预测未来的网络流量和用户行为，自动配置网络带宽和连接优先级，显著提高了网络的服务质量和用户体验。巫松^[99]提出，通过引入自适应调制和编码技术可以进一步提升数据传输的灵活性和网络的能力，以适应信道条件的实时变化，从而优化整个网络的性能和资源利用。

（2）智能故障预测与管理

在 ISCC 集成环境中，智能故障预测和管理技术是保障网络可靠性和稳定性的重要工具。通过部署先进的数据分析和模式识别技术，网络能够实时监控和诊断潜在的故障点，预测可能出现的系统故障。汪汀岚^[100]的研究指出，使用深度学习模型分析历史故障数据可以有效预测网络设备的故障概率，及早采取维护措施，从而减少系统的停机时间和维护成本。张鹏^[101]进一步强调，结合时间序列分析和异常检测算法能够提前识别出网络中的非预期行为和潜在故障，使得网络运维更加前瞻性和主动。

（3）资源动态分配和调度

随着 6G 网络中设备和服务种类的增多，动态资源分配和调度技术成为必需。这一技术依托于 ISCC 的高度集成性，使网络能够在感知到资源需求变化时，快速响应并优化资源分配。张鹏开发的动态资源调度系统利用实时数据分析，优化了数据流和计算任务之间的资源分配，有效降低了能耗同时保证了处理速度和准确性。杨勇^[102]指出，采用基于优先级的资源调度策略能够确保关键应用在资源竞争激烈的环境中优先获得必要的处理能力，从而

保障服务质量和用户体验。

2.4.6 一体化网络架构的层次性和论述

随着 6G 技术的发展，一体化网络架构成为实现高度数字化、智能化和绿色化社会的关键。该架构不仅涉及通信、感知与计算的深度融合，还需支持新兴的服务能力和应用价值，以满足未来社会对超高性能网络的需求。王友祥等人^[103]强调，6G 网络的一体化架构应分为资源层、功能层和管控层，这三层共同构成了网络的支撑、操作和管理基础，如图 5 所示。

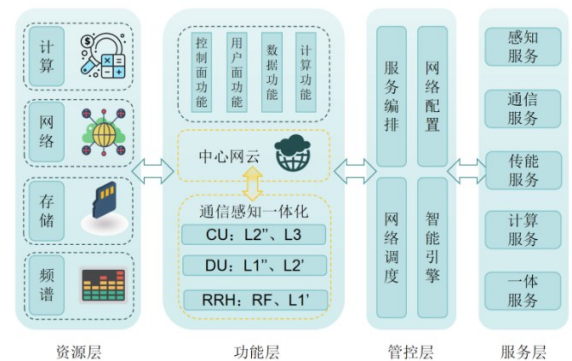


图 5 一体化网络架构层次图

Fig.5 Hierarchical Diagram of Integrated Network Architecture

资源层包括所有的物理和虚拟资源，如网络设备、计算资源和存储设备，这些资源是支持上层功能实现的基础。此外，资源层需要具备足够的灵活性和扩展性，以适应不断变化的网络需求和技术进步。功能层则负责将资源层提供的物理设施按需组织和调度，形成满足特定网络服务需求的逻辑功能单元。另外，功能层的设计应实现高度的模块化和可编程性，以便快速适应各种业务场景的需求，包括高速数据传输、大规模设备连接、低时延应用等。最上层的管控层则是整个网络架构中的智能中枢，负责整个网络的智能决策和策略执行。根据王友祥等人^[103]的研究，管控层需要利用先进的人工智能算法，对网络状态、业务需求和资源配置进行全面分析和优化，以保证网络服务的最优质量和资源利用效率。管控层的设计应能实现从资源分配到服务质量管理的全域自动化，大大降低人工操作需求，并

提升网络的响应速度和服务灵活性。

2.4.7 挑战

通信-感知融合作为未来智能系统发展的核心方向,旨在深度融合传感、通信和计算功能,以实现相互协作、资源共享,并提升多系统运行的智能化和自动化水平。然而,这一领域面临着诸多理论难题与技术挑战。在车联网中,感知-通信-计算一体化需要解决三者相互耦合与制约的问题,同时考虑到车辆的移动性、复杂的干扰特性、业务服务质量的强差异性以及计算能力的异构性,如何在多车间实现云端、边缘端的通信、计算、感知资源与多样化业务的自主适配,以及如何在多维资源受限下实现高效信息传递与低时延响应,都是亟待解决的技术难题^[104]。此外,未来的 6G 网络不仅需要支持从端到边缘的可靠数据传输,还需满足高精度感知和低计算延迟的智能应用需求,如沉浸式扩展现实、工业互联网和自动驾驶等。然而,这些应用部署在物联网设备上时,面临着计算复杂性和延迟方面的挑战,感知数据的长计算延迟可能大大降低感知结果的价值,甚至导致严重的安全事故^[105]。同时,人工智能方法的引入虽然提升了通信和感知系统的性能,但也带来了通信传输带宽、数据处理实时性以及安全隐私性方面的巨大挑战。因此,开发新的通信、感知与计算融合的网络架构,通过多维资源的协同共享,有效提升网络资源利用率和系统整体性能,成为当前亟待解决的问题。此外,通信感知一体化系统的干扰管理也是一大挑战,空域波束设计虽能实现一定的干扰抑制效果,但仍有待进一步提升,而人工智能技术的发展为这一问题的解决提供了新的途径^[106]。

3 ISCC 的高级应用

按照 ISCC 网络的覆盖区域大小以及日常生活使用频率^[107],ISCC 的高级应用大致可以体现在智能生活域,产业创新域和广域智联域,如图 6 所示。具体地,其中关键支撑技术包括无人驾驶技术、数字孪生网络、算力网络及空天地一体化网络等。在智能生活域中,无人驾驶技术作为关键技术之一,极大地推

动了智能交通系统的发展。在产业创新域,数字孪生网络和算力网络加速了制造业和服务业的数字化转型。同时,在广域智联域中,空天地一体化网络通过扩展通信和监测能力,实现了更广泛的区域连接和信息交换。这些技术不仅提升了现有系统的效率和性能,而且通过引入创新解决方案,极大地扩展了它们的应用范围。将在下文中具体探讨。



图 6 ISCC 的高级应用

Fig.6 Advanced Applications of ISCC

3.1 ISCC 在无人驾驶中的应用

ISCC 通过低延迟通信、实时环境感知（如毫米波雷达与摄像头融合）、和高效数据处理和计算技术,支持自动驾驶的高精度定位、协同避障与动态决策。



图 7 自动驾驶车联网中通信、感知、计算的关联

Fig.7 The Relationship Between Communication, Perception, and Computation in Autonomous Vehicle Network

在现代交通体系向智能化转型的背景下,车联网(Internet of Vehicles, IoV)作为低延迟通信技术在交通领域的重要技术实例,基于 3GPP 全球统一标准的通信技术,构建了车辆与车辆(V2V)、道路基础设施(V2I)、行人(V2P)以及网络(V2N)之间

的全方位通信网络,为自动驾驶和智能交通管理提供了至关重要的环境感知、信息交互与协同控制能力,如图7所示。

作为车辆、电子通信交通等领域的融合体,车联网技术不仅加强了车辆间的通讯同时显著提升反应时间和决策效率^[108]。以车联网为代表的无人驾驶技术已成为全球研究的热点,预示着未来交通智能化和高效化的趋势——打破通信、感知与计算三者的孤立,构建一个集成化的“云-边-端”协同体系,以提升整体性能与效率^[109]。

应用层面,ISCC 的加入显著改进了无人驾驶技术中的决策与安全性能。具体地,ISCC 能够更加高效地实现路径规划和行驶决策,以适应复杂多变的交通环境^[110],快速找到成本最低和冲突最少的行驶路线。借助遗传算法模拟^[111]、深度学习算法^[112]等技术,系统可以更好地预测和适应交通环境中的复杂变化,如突然的交通拥堵或紧急制动情况,还可以预测并识别不同类型的障碍物,从而提前做出减速或调整车道的决策。这不仅提高了道路安全,还增强了驾驶的舒适性和效率,使无人车更加符合现代交通系统的需求。例如,陈晋^[111]在其研究中指出,通过采用自适应巡航控制技术,无人车可以在不同速度下自动调整车距,响应前车的速度变化,从而在保持流畅行驶的同时确保安全距离,同时还引入了机器学习模型来增强决策的精度。类似地,Khandelwal^[110]在其论文中强调了模糊逻辑控制器在动态车辆控制中的应用,指出这种控制器在处理不确定和精确信息方面具有独特优势,可以在多变的路况中灵活调整车辆行为,提高驾驶安全性和舒适性针对安全领域的紧急反应方面,王刚等人^[113]在其研究中提到,在 ISCC 系统中使用实时动态路径规划技术能够在紧急情况下迅速重新规划行驶路线,避开障碍,确保车辆和乘客的安全^[114]。

未来的研究将进一步探索 ISCC 在无人驾驶领域的应用可能性,特别是针对系统集成和优化方面。多源数据融合与一致性问题尤为突出,不同车辆和路侧感知信息在时空坐标和精度上存在显著差异,如何实现高效的数据对齐与融合,并进行低时延通

信和计算是一大难点^[115]。如段建民^[116]所述,高效的系统集成需要标准化的数据交换协议和高速的通信网络,以确保各系统间的信息在实时性和准确性上能够满足无人驾驶的需求。此外,Duan^[117]在其研究中提到,集成系统必须具备高度的故障容错能力,以防单一系统的故障影响到整车的安全性。这通常通过冗余设计和实时监控机制来实现,确保在一个系统出现故障时,其他系统能够接管其功能,保持车辆的正常运行。对此,未来可以进一步研究通过模块化灵活地添加或更新单个系统,支持资源按需调配和功能重构,以适应不同道路场景^[104]。

从车联网的角度,Rovira^[109]探讨了感知不确定性以及车与车之间、车与基础设施之间的异构性,都会影响融合效果,需要进一步解决跨传感器及跨平台的数据同步和信任问题。不仅如此,共享环境感知也产生了保护车辆隐私的需求,可以发展联邦学习等隐私保护技术,在保护隐私的前提下,结合车载 AI 与边缘 AI,实现多车协同感知模型训练和决策,形成安全的协同智能^[115]。

系统优化方面,定期更新是保持系统性能与最新技术同步的重要手段。采用持续集成和持续部署的方法,可以快速实现软件功能的更新和缺陷修复,这对于应对不断变化的道路条件和规则至关重要^[118]。未来可以研究探讨优化算法,以进一步提升无人驾驶能力,例如徐文杰等所提到的,通过集成深度学习技术提升图像处理和对象识别的准确率,从而提高无人车的环境感知能力^{[119][120]}。类似地,熊天圣等人^[121]的研究强调了优化算法如何减少计算资源消耗的同时,增加系统的响应速度和决策准确性。最后,系统的性能优化还需考虑整体的系统集成和模块间的协调。系统优化不仅仅局限于单个模块的改进,还需要在系统级别进行优化,以确保各模块之间的最佳协同作用,从而实现整车系统的最优性能^[107]。

3.2 ISCC 在数字孪生网络中的应用

数字孪生,又称数据化身,数据影子等,是一种通过创建虚拟模型来模拟现实世界实体或系统的先进技术,用于在工作周期内提供对实体高精度的模拟,从而实现对实体的精确监控、维护与优化^{[122][123]}。

该概念最早源于航空航天领域,由 NASA 在 20 世纪 70 年代初期提出,最初用于帮助宇航员训练应对 Apollo 13 任务中的紧急情况。

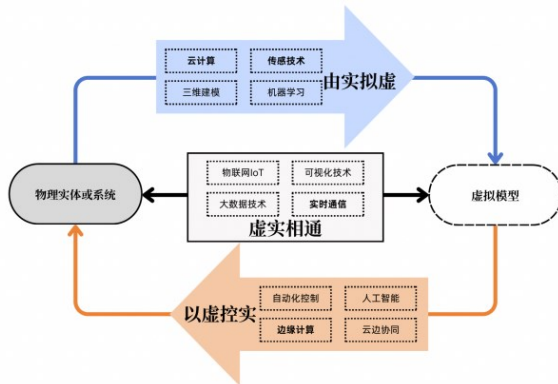


图 8 数字孪生网络架构

Fig.8 The architecture of data twin network

随着计算机及相关技术的进步,研究者们在其他领域开始探索构建数字虚拟实体的方法,以提升物理实体的性能。如今,这一理念已逐步扩展,多用于智慧工业场景下,包括航空航天^[124]、智能制造^[125]等。如图 8 所示,数字孪生的技术发展离不开物联网、云计算和人工智能等现代信息技术的支持。在这些技术领域中,通信、感知和计算在数字孪生技术网络里扮演着至关重要的角色,由此可见,ISCC 在数字孪生中的应用前景极为广阔。

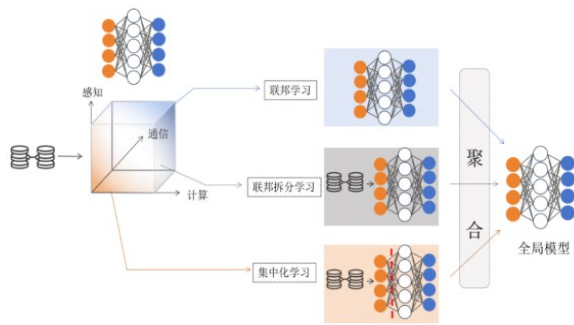


图 9 基于 ISCC 的混合 AI 训练平台

Fig.9 The hybrid AI training platform based on ISCC

首先,ISCC 可以用于帮助构建数字孪生网络。在构建数字孪生网络时,需处理来自动态多维时空下的多模态数据,需要强计算能力,同时还要考虑不同传感器的差异性。基于此,Wen 等人^[7]提

出了一种 ISCC 下集联邦学习、联邦拆分学习和集中化学习为一体的混合 AI 训练平台(如图 9),以满足不同传感器的各种需求,完成智能任务。

基于传感器的不同特性,该方法采用了三种训练策略:对于计算和通信能力较强且隐私需求高的场景,使用联邦学习;对于隐私需求较高但计算和通信能力有限的情况,采用联邦拆分学习;而对隐私需求较低且资源有限的传感器,则采用集中化学习,将原始数据直接传输至边缘服务器。在每次训练迭代中,这三种训练方案并行执行:联邦学习通过本地的在线和离线数据进行局部训练;联邦拆分学习将全局模型分为前端和后端,前端在设备上执行前向传播,后端在服务器上完成训练;集中化学习则在边缘服务器上处理实时收集的原始感知数据。训练结束后,三种方案的更新结果将被聚合以优化全局模型。在 ISCC 应用场景下,混合 AI 模型训练能够根据不同传感器的隐私需求进行灵活调整,有效地在时间、能耗和带宽等资源之间进行分配,最大限度地降低设备的长期资源消耗,延长设备的使用寿命。

另外,在赋能数字孪生的应用方面,Wei 等人^[126]尝试融合感知和通信,将 ISAC 的驱动数字孪生与用于智能机器(Intelligent Machine,IM)之中,在网络数据的聚合和有效使用和进而支持政策制定和优化过程等方面展现出良好的表现。然而,研究发现,在高动态环境下,对大量异质传感信息的传输和处理并不理想,即时通讯的高移动性和多域异构资源也为实时即时通讯网络带来了挑战。此外,由于 IM 通信网络的信道、节点分布和干扰变化迅速,数据收集过程存在巨大的不确定性,降低了 ISAC-DT 辅助下信道估计和多址访问的优化效果。而在 Wen 等人^[7]提出的基于 ISCC 的数字孪生网络中,数字孪生系统部署在边缘服务器上,用于执行所有复杂的计算密集型算法来构建虚拟模型,在网络边缘部署数字孪生的关键优势就在于对诸如资源分配、多址访问等网络任务做出准确、快速的决策,这需从传感器收集到数量足够且质量可得到保证的实时感测数据,并确保在感测、传输和处理过程中不被污染。

对于未来研究,Wen 等人^[7]提出,ISCC 技术的

设计需综合考量多种因素。首先,是传感器的感知能力,涵盖感知范围、数据质量、感知方式(如主动式如雷达或被动式如摄像头)及其对特定任务的重要性;

其次,在计算方面,由于数字孪生要求物理实体与虚拟模型的数据状态保持高度一致,但大量异构传感器数据的时延和新鲜度难以保证。若数据不同步或不够新鲜,将导致孪生体失真^[126]。这对包括计算与通信能力、信道增益、电池续航力、最大发射功率以及任务完成所允许的最大延迟提出了极大的要求。当面对多任务决策时,由于各任务间对 ISCC 资源的需求的竞争关系,进一步增加了 ISCC 系统设计的复杂度^[125],为了节省网络资源,未来可以设计机会传感器调度方案来选择传感器或是构建更加权威而统一的架构和标准,使其能够获得对所有任务都重要的实时和高质量数据。

3.3 ISCC 在算力网络中的应用

随着云计算、边缘计算技术的快速发展以及智能设备的广泛普及,全球算力资源的分布呈现前所未有的扩展。然而,传统网络架构在整合和利用这些分布式资源方面存在显著不足,如“算力孤岛”现象,导致资源利用碎片化^[127]。在“十四五”规划及数字经济发展战略的指引下,“新基建”成为国家信息技术基础设施升级的核心驱动力,催生了对高算力和大模型处理的需求,推动传统网络向智能化信息处理转型。在此背景下,算力网络(Computing Power Network, CPN)作为一种新兴计算范式应运而生,旨在通过网络连接并统一调度各种计算资源,打破数据中心、超级计算中心、云计算平台与边缘节点间的壁垒,形成高效协同的算力服务体系^[128]。我国主导的相关技术已广泛应用于边缘计算和云资源调度,尤其在“东数西算”工程的推动下,全国范围内的算力布局得到了显著优化,促进了东西部资源的协同发展^[108]。在算力网络中,ISCC 展现出巨大的潜力,通过优化感知、计算和通信之间的协同关系,有效提升资源配置效率,ISCC 不仅提高了频谱效率,降低了能耗,还优化了整体性能。例如,ISCC 中的基站可以通过无线信号检测目标动作,并将回波信号传

输到边缘服务器进行处理,从而提升算力网络的资源利用效率,同时减少端到端的延迟,支持智能监控等实时应用^[129]。

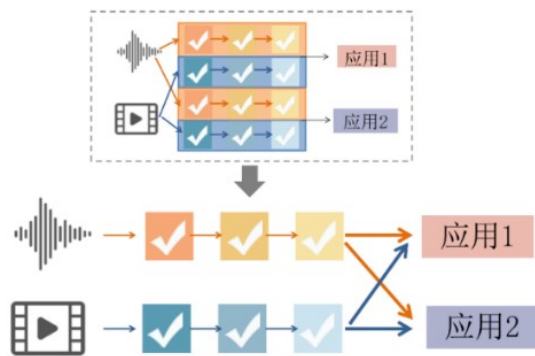


图 10 微架构服务示意图

Fig.10 Microarchitecture Service Diagram

微服务架构是算力网络中的一种重要软件架构风格,将复杂系统分解为一系列小型、自治的服务。每个服务可以独立开发、部署、扩展和维护,提升了系统灵活性,适应需求变化,并兼容异构的云、边缘服务器和移动设备的计算能力^{[130][131]}。基于微服务架构,Wen 等人^[7]探讨了 ISCC 的潜在应用:共享计算模块。传统计算架构中,每个任务都有自己的感知数据处理流程,不同任务间的中间计算结果无法共享,导致计算资源浪费和存储、通信成本增加。如图 10,微服务架构将任务的信号处理细分为多个计算模块,允许不同任务共享同一计算模块^[132]。

在 ISCC 的赋能下,感知活动及其初步数据处理在设备端完成,而涉及深度神经网络的复杂计算任务则转移至边缘服务器执行,例如应用用于无线感知信号的采样、杂波抵消和特征提取,以及视频流处理、帧分析和内容识别等模块^[133]以更进一步优化算力网络的性能^{[134][135]}。通感算一体化的设计,不仅能够减少计算和存储开销,还降低了设备处理结果传输到边缘服务器的通信负载^[136]。这种方式显著增强了隐私保护,因为避免了原始感知数据的传输,减少了低维特征提取带来的通信量,并减轻了计算卸载的需求。因此,通过 ISCC 在微服务架

构的应用,算力网络实现了计算资源的灵活调度与共享,解决了传统网络架构中的计算孤岛问题。

由于微服务架构对数据或信息的划分,应用 ISCC 的任务的完成需要多个节点的密切配合。为了更好地完成任务,同时节省感知、计算和通信方面的资源,可以构建如图 11 所示的有向图模型。

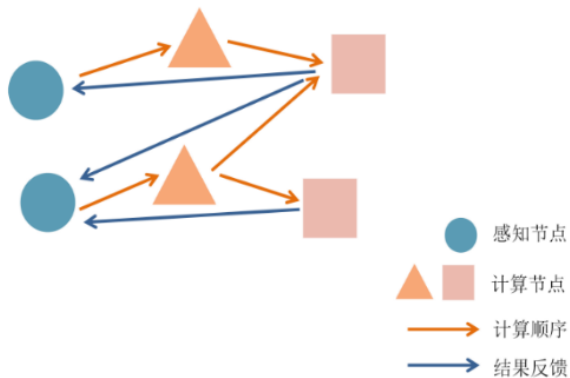


图 11 有向图模型

Fig.11 Directed Graph Model

在图 11 中,有两种类型的设备节点:一类是集通感算一体的多功能 ISCC 节点,另一类是仅具有通信和计算能力的节点。在执行 ISCC 任务时,通常一个目标能够被多个感知节点检测,且被相同的计算块部署在不同的计算设备上。这表明,ISCC 任务的实现具有多条路径选择。具体而言,如果节点到节点之间存在一条有向边,则表示上游节点将其计算结果有向地传输给下游节点进行后续处理,在任意给定的路径上,按照顺序执行感知操作以及所需的所有计算模块,从而达成任务目标;节点间是否存在有向边,取决于是否能够在这些节点之间建立可靠的无线通信连接,而这一连接的有效性则由诸如发射功率、带宽、传输时间和信道增益等参数决定。为了提高任务执行的效率并降低感知、通信和计算成本,在处理任务过程中需要寻找该有向图中的最优路径。

在具体应用中,ISCC 能够通过集成的方式,根据实时的网络状况和资源可用性智能地选择最佳的计算节点和路径执行特定任务,从而提高算力网络中任务执行的准确性和效率。这种智能化的任务分配和资源管理方式,不仅优化了网络资源的利用,还

促进了 6G 网络从“先通信再计算”向“计算优先”的趋势转变^[133]。

在未来,ISCC 在算力网络中的应用将大大提高,进一步拓宽未来研究的视野。由于其允许快速选择信道和低传输延迟等特性,ISCC 将持续在更多如元宇宙等的新兴领域发挥重要作用。正如 Wang X 等人^[135]所述,由于 ISCC 能够辅助精确的语音识别和其他语言处理任务,优化人机交互,并通过多维感知和泛在交流增强人工智能的能力。这不仅改进了元宇宙中的视觉体验等场景,也大大推动了其他人工智能技术领域的发展。通过融合技术、多维感知物理世界的各种信息、普适计算和通信能力,ISCC 在算力网络中的应用为更多前沿科技探索提供了可能。随着 ISCC 技术的不断创新和完善,其在算力网络中的应用将更加广泛和深入,将为全球通信网络的智能化和高效化提供有力支持。

3.4 ISCC 在空天地一体化网络中的应用

新兴技术和应用程序的迅猛发展,对移动通信网络低延迟和高效率的需求日益增长,而现有通信可能难以满足这些要求,因此,未来 6G 网络需要引入卫星系统、空中网络和地面通信等集成为新型网络架构。空天地一体化网络是以地基网络为基础,天基网络和空基网络为扩展,为广域空间范围内的各类应用提供无所不在、智能、协同且高效信息支持^[137]。

目前,对 ISCC 应用于空天地一体化网络的研究还处于初步阶段,现有相关工作主要集中于通感、感算、通算的双边能力融合^[138]。例如通感一体化 ISAC 通过空口及协议联合设计等方式,在高精度感知的同时进行高质量数据传输,提升通信效率、扩展感知范围^[139]。感知计算 ISC 一体化技术融合数据感知收集与实时计算分析,实现更为准确高效的数据处理和决策^[140]。通信计算一体化 ICC 研究更为成熟,大量工作结合移动边缘计算技术进行通信与计算资源联合优化,有效应对空天地一体化的环境复杂、资源有限、需求多样等挑战,提高网络承载力与稳定性^{[141][142]}。

基于上述通信、感知、计算两两融合的可行性,

有研究者们提出了通感算一体化模型架构的初步设想。针对 6G 数据驱动的多维业务需求, 闫实等人^[7]构建了由中心网云、一体化网元和分布式终端组成的通感算融合网络架构。

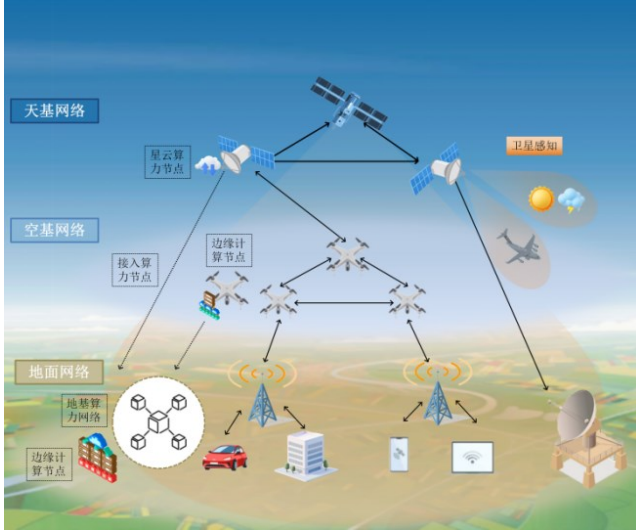


图 12 基于 ISCC 的空天地一体化网络

Fig.12 The integrated space-terrestrial network based on the ISCC

具体地, 运用通感算一体化的空天地一体化网络体系如图 12 所示, 融合了高轨 GEO 和中低轨 NGSO 卫星通信网络以及无人机等构成的空基网络, 以及地面移动通信网络。形成了高、中、低及地面网络的空天地分层结构^[142]。天基网络利用通信卫星的立体覆盖能力, 结合地面网络的 SDN 与 NFV 技术、边缘计算及云边协同机制, 构建了具有统一接口、自主路由及无缝组网特性的星云算力节点^[143]。空基网络一般部署在地面移动网络无法覆盖的地方作为地面网络的补充, 作为地基网络的边缘节点, 填补地面网络通信和算力的空白或盲区。地面网络承担主要的算力供应任务, 凭借其高带宽、低延迟的特点, 满足复杂运算需求。这种天基与地面网络的分布式协同, 实现了网络服务与算力资源向边缘的扩展, 并且提供广域快速感知与精准定位能力, 增强通信网络的覆盖范围和稳定性^[144]。

部分工作则聚焦于空天地一体化的特定难题, 以 ISCC 为解决点展开相关研究^[140]。在空天地一体化网络中, 卫星的全球覆盖特性使得无人机能够作

为中继和链路, 连接卫星与地面, 提供回程连接。同时, 无人机搭载的远程传感器能够从全球角度探测和监测地球系统的特征。基于此, Wen 等人^[7]提出了基于地面传感和基于遥感的两个 ISCC 框架。为缓解空天地一体化网络环境中由节点众多且能力受限所引发的通信阻塞, 景毅等人^[145]提出了一种基于联邦学习的通感算融合架构, 该架构赋能卫星与无人机实现一体化的数据采集、处理及分发, 能够向地面终端用户提供低延迟及高服务质量的支持问题。在作为国家战略资源的低空领域, 李晨玮等人^[146]指出 ISCC 通过对智能互联技术的应用, 实现了对低空飞行器的有效监测与管理, 增强了地面车联网系统的功能, 推动了未来低空应用的安全性和智能化进程。

具体应用上, ISCC 目前为偏远地区通信、灾害应急响应、全球物联网等应用提供了技术支撑, 取得了一定进展。在偏远地区通信方面, ISCC 可通过整合卫星通信、地面基站等多种通信资源, 实现信号的广域覆盖, 确保信息的有效传递^[147]。在灾害应急响应中, 其快速部署和灵活调整的能力使得救援队伍能够及时获取现场信息, 提高救援效率^[148]。对于全球物联网应用, ISCC 提供了强大的数据处理和传输能力, 支持海量设备的连接和数据交互, 推动了物联网产业的发展^{[149][150]}。

表 7: 国内空天地一体化网络技术进展

Table7 Advances in domestic space-ground integrated network technology

技术领域	技术/案例	中国移动 [151]	中国电信 [152]	中国联通 [153]
通信	5G-A 通感一体	4.9GHz 试验网	5G-A+ 卫星融合	毫米波道感一体技术
	混合感知空口	多维立体感知融合	通智一体动态监测	AI 增强定位回传
感知	低空智能感知	鱼鳞动态组网技术	雷达/视觉多模态融合	毫米波+AI 识别
计算	低空数据智能处理	动态三维航图(星地协同)	天翼云+AI 路径规划	高精度避障算法(端云协同)
管控	无人机管控平台	中移凌云	星巡/星云平台	沃天宇

表 7 汇总了国内三大运营商在实现空天地一体化的网络方面的最新进展。三大运营商分别打造了各自的无人机管控平台,如中国移动的中移凌云、中国电信的星巡/星云平台、中国联通的沃天宇。这些技术突破和应用拓展,为低空经济的规模化发展奠定了坚实基础。通过融合通信、感知和计算技术,ISCC 将为空天地一体化网络提供更强大的支持,推动全球通信网络的智能化和高效化发展。

然而,ISCC 在空天地一体化中的应用仍面临诸多挑战。在系统级优化方面,通信、感知与计算技术的高度整合仍需深入研究,以实现更加高效的一体化协同^[46]。此外,无人机受限于电池续航,卫星受限于能源供应,网络设计必须注重能源效率。大规模低轨卫星虽然提供了连续覆盖,但如果大量任务卸载到星群上,整体能耗将剧增,需要进一步优化能源管理策略。由于空天地一体化网络的复杂性,卫星通信易受极端空间环境(如太阳风暴、强气象干扰)的影响,导致天-地链路可能不稳定。类似地,空地视距链路引起的干扰问题^{[154][155]}以及通信时间同步^[156]也是存在的严峻问题,未来研究需要进一步探索。

4 未来挑战

在 6G 通感算一体化网络中,各网元设备通过软硬件资源的协同与共享,实现了多维感知、协作通信、智能计算功能的深度融合与互惠增强。这种深度融合不仅能够提升信息处理的效率,还能显著降低时延、提高系统的可靠性,从而满足未来多样化新兴业务的需求^[154]。尤其是在超高带宽、超低时延的应用场景下,如智能制造、自动驾驶、虚拟现实和增强现实等,6G 网络将扮演关键角色,推动这些领域的技术飞跃。

国际电信联盟(ITU)基于现有的国际移动通信(IMT)标准,提出了 6G 的六大应用场景:沉浸式通信(Immersive Communication)、超高可靠低时延通信(Hyper Reliable and Low Latency Communication)、海量通信(Massive Communication)、泛在连接(Ubiquitous Connectivity)、人工智能与通信(Artificial Intelligence and Communication)、以及 ISCC^[155]。这

些场景的实现,将推动未来各行各业的数字化转型,为全社会带来前所未有的创新机遇。然而,尽管 6G 通感算一体化网络的潜力巨大,其构建过程仍面临一系列技术挑战。以下是一些关键难题:

4.1 一体化性能理论框架缺失

当前集成感知、通信与计算(ISCC)系统的性能评估尚未形成统一的理论框架,尤其在通信与感知资源深度共享的场景下,协同增益的量化机制与性能边界仍存在显著不确定性。现有研究虽提出部分度量指标,但其通常建立在正交资源分配或稳态信道条件等理想化假设基础上,难以准确刻画动态环境中多域资源竞争引发的非线性耦合效应。此外,如车联网中毫米波通信与激光雷达的协同等异构硬件融合场景进一步加剧了统一建模的难度。针对这一问题,亟需构建能够兼容异构场景的数学建模方法,并通过扩展信息论框架重新定义感知、通信与计算的联合熵极限,从而为系统性能边界提供理论支撑^[154]。

4.2 超动态环境下的实时资源协调

在空天地一体化网络等超动态场景中,集成感知、通信与计算(ISCC)需实现频谱、算力及感知资源的实时协同调度。然而,现有资源管理策略多依赖离线优化或局部信息反馈机制,难以适应如低轨卫星节点高速移动、地面基站突发失效的全域拓扑突变引发的多目标冲突问题。具体而言,传统离线优化算法因更新周期长,无法响应毫秒级链路中断或计算负载激增,而基于局部信息的分布式决策则因全局状态感知缺失,易导致资源分配次优甚至系统震荡。研究表明,现有算法在时延与稳定性协同优化方面存在显著性能缺口,严重制约高可靠业务的部署^[142]。此外,多域资源耦合性进一步加剧了实时协调的复杂度,亟需构建具备在线学习与全局博弈能力的动态优化框架以逼近理论性能边界^[145]。

4.3 多模态数据的语义级融合瓶颈

ISCC 系统需协同处理雷达点云、视觉图像、通信信号等异构模态数据,然而现有融合技术仍以特征级拼接为主流,缺乏跨模态语义关联与一致性保

障机制。例如，在自动驾驶场景中，毫米波雷达的点云稀疏性与摄像头 RGB 图像的稠密特征间存在显著语义鸿沟，传统基于特征向量的加权融合方法难以实现目标运动轨迹与空间语义的精准匹配，导致多源数据互补性优势无法充分发挥。研究表明，此类特征级融合在动态障碍物识别任务中的误判率较高，严重制约系统可靠性^[29]。

当前技术瓶颈主要源于两方面：其一，多模态数据的异构性导致时空对齐偏差。雷达信号的时间戳精度（微秒级）与视觉帧采样率（毫秒级）差异会引发时序异步问题；其二，语义表征维度不匹配。通信信号中的信道状态信息（CSI）与视觉语义特征分属物理层与语义层，两者的跨模态映射缺乏统一的知识图谱支撑。针对这一问题，需构建基于深度语义理解的融合框架，通过引入跨模态注意力机制与时空对齐网络，实现从底层特征到高层语义的联合推理。未来研究需进一步探索语义知识蒸馏与动态自适应融合机制，以应对复杂环境下的数据分布漂移问题。

4.4 超低时延与超高可靠性的矛盾平衡

随着 6G 网络向远程手术、工业控制及自动驾驶等高安全性垂直行业渗透，端到端时延需严格约束于 0.1ms 以内^[157]。此类场景中，微秒级时延波动或瞬时信号中断均可能引发重大安全事故，例如工业机械臂控制指令的传输延迟超过阈值将直接导致生产系统崩溃。然而，集成感知、通信与计算（ISCC）框架的引入显著加剧了系统复杂性：感知数据的高速采集、通信链路的动态调度与计算任务的实时处理形成多维资源竞争，导致传统基于静态优先级或固定时隙分配的优化模型难以实现多目标协同。

现有解决方案在时延、能耗与可靠性三者的协同优化中仍存在显著瓶颈。现存矛盾凸显了传统方法在帕累托边界上的固有缺陷。为此，亟需探索轻量化智能算法与硬件-软件协同设计的新型范式，例如基于元学习的微型神经网络可实现感知数据特征的动态压缩，在降低计算复杂度的同时控制端到端存在的时延；而可编程无线接口与近似计算硬件的协同设计，可通过硬件级容错机制提升系统能效^[135,138]。未来研究需进一步突破跨层优化理论，以解

决超低时延与超高可靠性的本质性冲突。

4.5 隐私与安全的跨域协同防护

集成感知、通信与计算（ISCC）的多节点数据共享机制在提升系统效能的同时，显著加剧了隐私泄露风险。在车联网、工业物联网等典型场景中，节点间的感知数据与通信信令频繁交互，传统加密技术因引入毫秒级计算延迟而难以满足超低时延约束。

尽管联邦学习与差分隐私技术已被应用于跨域协同场景，但其实际部署仍面临严峻挑战。联邦学习的多轮迭代机制在工业设备群协同训练中会引发大量的通信开销，且模型参数交换过程易遭受中间人攻击；差分隐私虽然可通过噪声注入实现数据脱敏，但噪声强度的动态适配不足会导致关键特征信息损失率较高，严重影响感知任务精度^[106]。现有方案在隐私保护强度、计算效率与模型可用性间尚未形成普适性均衡策略，尤其在跨运营商、跨协议的异构网络环境下，安全边界的量化评估仍缺乏统一标准。

针对上述问题，需构建轻量化全链路防护体系，通过嵌入式可信执行环境与轻量级同态加密的协同设计，在硬件层实现数据加密与隐私计算的时延预补偿。未来研究需进一步探索可验证计算与零知识证明在跨域认证中的融合机制，以突破隐私安全与实时性协同优化的理论瓶颈。

6G 通感算一体化网络通过多维感知、协作通信与智能计算的深度融合，为高价值场景提供了颠覆性技术架构，但其大规模部署仍面临多维度挑战。在理论层面，现有性能评估框架难以刻画动态环境下通信、感知与计算资源的非线性耦合特性，尤其缺乏对异构硬件融合场景的统一建模能力；在算法层面，超动态环境中的实时资源协调机制尚未突破时延-稳定性权衡瓶颈，多模态数据的语义级融合精度受限于时空异步性与表征维度失配问题；在系统层面，超低时延与超高可靠性的协同需求加剧了资源竞争冲突，而多节点数据共享引发的隐私泄露风险对传统安全防护体系构成严峻考验。值得关注的是，上述挑战并非独立存在——感知任务的前导符号压缩会引发通信误码率陡增，语义融合偏差可能导致计算资源分配失准，而隐私保护机制引入的时延波动将进

一步恶化系统可靠性。这种跨域耦合效应要求研究范式从单点突破转向全局协同,需在理论建模中嵌入多目标动态博弈机制,在算法设计中建立跨模态因果推理链路,并在系统架构层面实现安全防护与资源调度的深度耦合。唯有通过多层级、多维度的协同优化,方能破解 6G 通感算一体化网络的核心技术瓶颈。

5 总结与展望

随着 6G 技术的不断成熟,我们正处于迈向一个全新的智能网络时代,通信、感知与计算的融合成为未来信息网络的核心基础。本综述指出了 6G 时代通信-感知-计算融合网络在未来数字社会中的核心地位,并系统性地分析了 6G 时代通信-感知-计算融合网络的架构、关键技术及其所面临的挑战,明晰了实现这一愿景所需的技术突破与创新路径,为未来网络技术的创新与发展提供全面的学术洞见。

5.1 结论

6G 网络不仅是技术发展的自然延伸,也是推动全球数字经济变革的关键动力。未来 6G 的发展将以原创性技术为核心,以确保在全球通信领域的领先地位。同时,标准化进程的加速、知识产权保护体系的健全以及与大数据、人工智能、区块链等前沿技术的跨界融合,将是实现通感算一体化网络的核心路径,推动技术生态系统的全面革新。通感算融合网络的构建将有效提升网络智能化、实时性和资源利用效率,但要全面实现这一目标,还需解决架构设计、协议优化、资源管理、安全隐私等诸多技术难题。随着 6G 相关技术的进一步演进,通感算融合网络将为人类带来前所未有的创新信息服务,推动全球迈向全新的智能互联时代。这一网络革命不仅将重塑行业格局,还将深远影响未来社会的经济与技术发展,为构建高度智能、互联的全球数字生态系统奠定坚实基础。

5.2 未来展望

未来 6G 网络的发展将呈现以下趋势:

(1) 通感算智一体化

未来的 6G 网络将朝着通感算智一体化的方向

发展,实现通信、感知、计算、智能的深度集成^[106]。这种集成不仅能够优化网络资源的使用效率,还将显著提升服务的质量和智能化水平,推动 5G-A 和 6G 系统向更高级别的智能化演进。具体可包括:多模态感知与智能决策(通过整合来自视觉、雷达、激光雷达等多模态感知数据,6G 网络将实现对环境的全面感知与智能决策)、智能资源管理与优化(未来的 6G 网络将基于人工智能技术,实现感知、通信、计算资源的动态调配与优化)与硬件与算法的协同创新(未来的传感器和计算芯片将朝着高效能、低功耗的方向发展,以支持复杂算法在边缘计算环境中的高效执行)。

(2) 通信-感知-计算-存储的深度融合

未来的 6G 网络将进一步推动通信、感知、计算与存储能力的深度融合,以满足智能制造、无人驾驶、智慧医疗等新兴应用对时延、数据处理和存储能力的极高要求^[158]。具体发展方向包括:实时性与低时延保障(通过引入边缘计算、雾计算等新型架构,6G 网络将实现亚毫秒级的端到端时延,为自动驾驶、远程手术等对实时性要求极高的应用提供可靠支持)、智能频谱共享与效率提升(采用基于人工智能的动态频谱共享技术,实现感知与通信功能在同一频谱上的高效协同)、分布式存储与计算(深度融合存储能力,支持海量数据的分布式存储与处理)。同时,未来的 6G 网络将更加注重数据安全与隐私保护,结合区块链、差分隐私和联邦学习等技术,构建多层次的安全防护体系。例如,在智慧医疗场景中,通过联邦学习技术,在不共享患者原始数据的前提下实现跨机构的协同分析与诊断。

作者贡献声明

刘壮负责整体研究框架的设计和论文的撰写;吴宇赫负责通信-感知-计算融合技术部分的撰写,并参与讨论;陈雨然负责对相关理论结合实践的调研,以及对相关技术的分析和总结;刘芮彤、董晏宁、赵军共同参与了文献整理以及部分撰写等工作,对论文提供补充修改意见。所有作者均为同等贡献作者。

参考文献:

- [1] LIU X, NGAI Edith. Distributed machine learning for internet-of-things in smart cities[C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII). IEEE, 2019: 368-374.
- [2] 徐勇军,曹娜,陈前斌.通信感知一体化波形设计方法综述[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2023,35(06):981-991.
XU Y J, CAO N, CHEN Q B. Review of waveform design method for communication and perception integration [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023,35(06):981-991.
- [3] 钟怡,毕添琪,王菊,等.面向通信感知一体化的无线跨域感知研究综述[J].信号处理,2023,39(06):951-962.DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.001
ZHONG Y, BI T Q, Wang J, et al. Survey on Cross-Domain Based Device-free Sensing Technology for Integrated Sensing and Communication[J] Journal of signal processing, 2023, 33 (6) 6:951-962. The DOI: 10.16798 / j.i SSN. 1003-0530.2023.06.001.
- [4] ZHAO M K, HUANG Y S, LI X. Federated learning for 6G: A survey from perspective of integrated sensing, communication and computation[J]. ZTE Communications, 2023, 21(2): 25.
- [5] WANG X J, GUO Q, NING Z L, et al. Integration of sensing, communication, and computing for metaverse: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 2024, 56(10): 1-38.
- [6] 于刊,李东,张奇勋,等.车联网泛在感知、潜在通信、融合计算、内生安全综述:最新进展与未来方向[J].通信学报, 2024,45(11):223-243.
YU J, LI D, ZHANG Q X, et al. Survey of ubiquitous sensing, potential communication, integrated computing, and inherent security for Internet of vehicles: latest developments and future directions [J]. Journal of Communications, 2024,45(11):223-243.
- [7] WEN D, ZHOU Y, LI X, et al. A survey on integrated sensing, communication, and computation[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024.
- [8] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44 (04) : 1-11. DOI:10.13190/j.jbupt.2021-081.
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of Communication, Sensing and Computing: the Vision and Key Technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44 (04) : 1-11.
- [9] 裴郁杉, 唐雄燕, 黄蓉, 等. 通信感知计算融合在工业互联网中的愿景与关键技术[J]. 邮电设计技术, 2022, (03) :14-18.
- PEI Y S, TANG X Y, HUANG R, et al. Vision and Key Technologies of Communication Sensing and Computing Integration in Industrial Internet [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022, (03) : 14-18.
- [10] 人民日报海外版. 5G网络规模和质量世界领先——中国5G 移动电话用户占比近半[OL].https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6929059.htm, 2024-01.
PEOPLE'S DAILY OVERSEAS EDITION. China leads in 5G network scale and quality—nearly half of the world's 5G mobile users are in China[OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6929059.htm, 2024-01.
- [11] 新华社.我国成功搭建国际首个通信与智能融合的 6G 试验网[OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6929059.htm, 2024-07.
Xinhua News Agency. China successfully builds the world's first 6G test network integrating communication and intelligence[OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202401/content_6929059.htm, 2024-07.
- [12] 汪春霆. 新基建下的卫星通信与 5G/6G[C]//中国通信学会. 2020 中国卫星应用大会报告集. 中国电子科技集团公司, 2020: 56. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.047694.
WANG C T. Satellite communication and 5G/6G under new infrastructure[C]//China Institute of Communications. 2020 China Satellite Application Conference Report Collection. China Electronics Technology Group Corporation, 2020: 56. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.047694.
- [13] QIAO L, LI Y, CHEN D, et al. A survey on 5G/6G, AI, and Robotics[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 95: 107372.
- [14] McGoldrick P, Griffiths G J, Nemet A, et al. MIMO Assembly of a Meandered-line Antenna for 6G and Beyond Indoor Wireless Frontends[C]//2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and IN C/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI). IEEE, 2024: 383-384.
- [15] Fettweis G, Hassler M, Wittig R, et al. A low-power scalable signal processing chip platform for 5G and beyond-kachel[C]//2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2019: 896-900.
- [16] Rasti M, Taskou S K, Tabassum H, et al. Evolution toward 6G multi-band wireless networks: A resource management perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(4): 118-125.
- [17] 郎为民, 马卫国, 安海燕, 等 6G 关键能力指标分析[J].

- 电信快报, 2023, (09): 1-3+7.
- LANG W M, MA W G, An H et al. Analysis of key capability indicators of 6G[J]. Telecommunications Information, 2023, (09): 1-3+7.
- [18] 彭木根. 主编观点[J]. 移动通信, 2024, 48 (03): 1.
- PENG M G. Editor-in-Chief's perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48 (03): 1.
- [19] 潘成康, 王爱玲, 刘建军, 等. 无线感知通信一体化关键技术分析[J]. 无线电通信技术, 2024 47 (02): 143-148.
- PAN C G, WANG A L, Liu J J, et al. Technology Analysis of Integration of Wireless Sensing and Communication [J]. Radio Communication Technology, 2024, 47 (02): 143-148.
- [20] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR[C]//IEEE Proceedings F (Radar and Signal Processing). IET Digital Library, 1992, 139 (2): 122-135.
- [21] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Gammar sar and interferometric processing software[C]//Proceedings of the ERS-Envisat symposium, Gothenburg, Sweden. 2000, 1620: 1620.
- [22] CHEN X, KE J C, TANG W, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 10 (10): 2155-2159.
- [23] Rohling H, Meinecke M M. Waveform design principles for automotive radar systems[C]//2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No. 01TH8559). IEEE, 2001: 1-4.
- [24] SHI C, WANG F, Sellathurai M, et al. Power minimization-based robust ofdm radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 66 (5): 1316-1330.
- [25] KURACH K, LUCIC M, ZHAI X, et al. The GAN landscape: Losses, architectures, regularization, and normalization[J]. 2018.
- [26] LI X, WANG C, YUAN H, et al. Smeared spectrum jamming suppression based on time unit analysis and polarization cancellation[J]. Cluster computing, 2019, 22: 14367-14375.
- [27] Khobahi S, Bose A, Soltanian M. Deep radar waveform design for efficient automotive radar sensing [C]//2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). IEEE, 2020: 1-5.
- [28] Radford A, Kim J W, Hallacy C, et al. Learning transferable visual models from natural language supervision [C]//International conference on machine learning. PMLR, 2021: 8748-8763.
- [29] LI J N, LI D X, XIONG C M, et al. Blip: Bootstrapping language-image pre-training for unified vision-language understanding and generation[C]//International conference on machine learning. PMLR, 2022: 12888-12900.
- [30] Baltrušaitis T, Ahuja C, Morency L P. Multimodal machine learning: a survey and taxonomy[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 41 (2): 423-443.
- [31] HUANG X, MA T, JIA L, et al. An Effective multimodal representation and fusion method for multimodal intent recognition[J]. Neurocomputing, 2023, 548: 126373.
- [32] ZHAO S, LIU T, ZHAO S, et al. A neural multi-task learning framework to jointly model medical named entity recognition and normalization[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2019, 33 (01): 817-824.
- [33] Akhtar M S, Chauhan D S, Ghosal D, et al. Multi-task learning for multi-modal emotion recognition and sentiment analysis[J]. arXiv preprint arXiv:1905.05812, 2019.
- [34] Venugopalan S, Xu H, Donahue J, et al. Translating videos to natural language using deep recurrent neural networks[J]. arXiv preprint arXiv:1412.4729, 2014.
- [35] Kline A, Wang H, Li Y, et al. Multimodal machine learning in precision health: a scoping review[J]. npj Digital Medicine, 2024, 5 (1): 171.
- [36] Barnum G, Talukder S, Yue Y. On the benefits of early fusion in multimodal representation learning[J]. arXiv preprint arXiv:2011.07191, 2020.
- [37] WU J, GAO J, YI J, et al. Environment perception technology for intelligent robots in complex environments: A Review[C]//2022 7th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). IEEE, 2022: 479-485.
- [38] SUN L, XU H, WANG Z, et al. Review on key common technologies for intelligent applications of industrial robots[J]. J. Vib. Meas. Diagn, 2021, 41: 211-219.
- [39] 胡青松, 孟春蕾, 李世银, 等. 矿井无人驾驶环境感知技术研究现状及展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 128-140.
- HU Q S, MENG C L, LI S G, et al. Research status and prospects of perception technology for unmanned mining vehicle driving environment [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 128-140.
- [40] 喻俊志, 孔诗涵, 孟岩. 水下视觉环境感知方法与技术[J]. 机器人, 2022, 44 (02): 224-235. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210323.
- YU J Z, KONG S H, MENG Y. Methods and Technologies for Visual Perception of Underwater Environment [J]. Robot, 2022, 44 (02): 224-235. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210323.

- [41] 邸凯昌,王稼,邢琰,等. 深空探测车环境感知与导航定位技术进展与展望[J]. 测绘学报,2021,50(11):1457-1468.
- DI K C, WANG J, XING Y, et al. Progresses and prospects of environment perception and navigation for deep space exploration rovers [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(11): 1457.
- [42] Amigoni F, Somalvico M. Multiagent systems for environmental perception[C]//Proceedings of the “Third AM S (American Meteorological Society) Conference on Artificial Intelligence Applications to Environmental Science”, Preprints CD-ROM and Abstract Volume. 2023: 487.
- [43] 陈睿韵, 田文斌, 鲍海波, 等. 农业轮式机器人三维环境感知技术研究进展[J]. 智慧农业, 2023, 5 (04) : 16.
- CHEN R Y, TIAN W B, BAO H B, et al. Three-Dimensional Environment Perception Technology for Agricultural Wheeled Robots:A Review [J]. *Smart Agriculture*, 2023, 5 (04) : 16.
- [44] 胡泽杨,成国梁,游昌盛.基于信道知识地图的智能通信与感知技术[J/OL].无线电工程,1-12[2025-02-08].
- HU Z Y, CHENG G L, YOU C S. Intelligent Communication and Perception Technology Based on Channel Knowledge Map [J/OL]. *Radio Engineering*, 1-12 [2025-02-08].
- [45] LI J, GAO H, LV T, et al. Deep reinforcement learning based computation offloading and resource allocation for MEC[C]//2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2018: 1-6.
- [46] YAN J, LU Q, Giannakis G B. Bayesian optimization for task offloading and resource allocation in mobile edge computing[C]//2022 56th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2022: 1086-1090.
- [47] FANG F, XU Y, DING Z, et al. Optimal resource allocation for delay minimization in NOMA-MEC networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 68 (12) : 7867-7881.
- [48] WU Y C, DINH T Q, FU Y, et al. A hybrid DQN and optimization approach for strategy and resource allocation in MEC networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20 (7) : 4282-4295.
- [49] Mahmud R, Srirama S N, Ramamohanarao K, et al. Profit-aware application placement for integrated fog-cloud computing environments[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2024, 135: 177-190.
- [50] PAN Y, PAN C, WANG K, et al. Cost Minimization for cooperative computation framework in MEC networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20 (6) : 3670-3684.
- [51] DAI P, HU K, WU X, et al. A probabilistic approach for cooperative computation offloading in MEC-assisted vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 23 (2) : 899-911.
- [52] WANG B, LIU Y, SHOU G, et al. Energy consumption minimization using data compression in mobile edge computing[C]//2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICC). IEEE, 2020: 911-916.
- [53] WAN S, LI X, XUE Y, et al. Efficient computation offloading for internet of vehicles in edge computing-assisted 5G networks[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2024, 76: 2518-2547.
- [54] Abou El Houda Z, Brik B, Ksentini A, et al. A MEC-based architecture to secure IoT applications using federated deep learning[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2023, 6 (1) : 60-63.
- [55] HAO X, Yeoh P L, ShE C, et al. Secure deep reinforcement learning for dynamic resource allocation in wireless MEC networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023.
- [56] LI C Y, LIN Y D, LAI Y C, et al. Transparent AAA security design for low-latency MEC-integrated cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 69 (3) : 3231-3243.
- [57] WANG K, LI H, DING Z, et al. Reinforcement learning based latency minimization in secure NOMA-MEC systems with hybrid SIC[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 22 (1) : 408-422.
- [58] HE B, BAI K J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review[J]. *Advances in Manufacturing*, 2024, 9 (1) : 1-21.
- [59] LI B, Petropulu A P, Trappe W. Optimum co-design for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64 (17) : 4562-4575.
- [60] LI B, Petropulu A P. Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53 (6) : 2846-2864.
- [61] LIU R, LI M, Luo H, et al. Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: opportunities, applications, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30 (1) : 50-57.
- [62] Elbir A M, Mishra K V, Shankar M R B, et al. The rise of intelligent reflecting surfaces in integrated sensing and communications paradigms[J]. *IEEE Network*, 20

- 22, 37 (6): 224-231.
- [63] Khawar A, Abdelhadi A, Clancy C. Target detection performance of spectrum sharing MIMO radars[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 15 (9): 4928-4940.
- [64] WANG J, JIANG C, ZHANG H, et al. Thirty years of machine learning: the road to Pareto-optimal wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 22 (3): 1472-1514.
- [65] ZHOU X, SUN M, LI G Y, et al. Intelligent wireless communications enabled by cognitive radio and machine learning[J]. China Communications, 2018, 15 (12): 16-48.
- [66] WANG Y, WU K, NI L M. Wifall: device-free fall detection by wireless networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 16 (2): 581-594.
- [67] HUANG J, WANG C X, BAI L, et al. A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems[J]. IEEE Transactions on Big Data, 2023, 6 (2): 211-222.
- [68] CAO Y, WANG F, LU X, et al. Contactless body movement recognition during sleep via WiFi signals[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7 (3): 2028-2037.
- [69] LI J, Hwang S H. Adaptive Beamforming Scheme for Coexistence of 5G Base Station and Radar Altimeter[J]. ICT Express, 2025.
- [70] Rodriguez-Orduna E, Antonio-Lopez J E, Amezcua-Correa R, et al. RF signal transmission using coherence modulation and space division multiplexing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 186: 108776.
- [71] WANG R, ZHANG X, ZHANG S, et al. Multi-channel FBG frequency division multiplexing sensing system based on EOIM and OFDL[J]. Optics Communications, 2025, 576: 131320.
- [72] MA R, XU J. A high-performance reversible data hiding scheme for audio streams based on code division multiplexing[J]. IEICE Communications Express, 2025.
- [73] 刘家亮, 王文博, 张凡, 等. 基于堆叠式传感器的胡萝卜播种机监控系统[J]. 工程机械, 2025, 56(01): 16-20+210.
- LIU J L, WANG W B, ZHANG F, et al. Monitoring System for Carrot Seeder Based on Stacked Sensors [J]. Construction Machinery & Equipment, 2025, 56(01): 16-20+210.
- [74] 张伟, 吴季航, 杜雨鑫, 等. 基于光纤无线融合的监测通信一体化系统[J]. 测试技术学报, 2025, 39(01): 1-6.
- ZHANG W, WU J H, DU Y X, et al. Integrated Monitoring and Communication System Based on Fiber Optic Wireless Fusion [J]. Journal of Test & Measurement Technology, 2025, 39(01): 1-6.
- [75] 冯志勇, 尉志青, 马昊, 等. 一种基于多雷达协同探测的雷达探测方法及装置: CN201910703507.6[P]. 2025-03-08.
- FENG Z, YU Z, Ma H, et al. A Radar Detection Method and Device Based on Multi-radar Collaborative Detection: CN201910703507.6[P]. 2025-03-08.
- [76] 北京邮电大学. 一种阵列天线、波束成形方法及感知和通信一体化系统: CN110611527B[P/OL]. 2021-01-15 [2025-03-08]
- Beijing University of Posts and Telecommunications. An array antenna, beam forming method and perception and integration of communications system: CN110611527B [P/OL]. [2025-03-08] 2021-01-15
- [77] 北京邮电大学. 基于波束功率分配的雷达通信一体化协同探测方法及装置: CN110261848B[P/OL]. 2021-04-30 [2025-03-08]
- Beijing University of Posts and Telecommunications. Based on radar communications integration of the beam power allocation collaborative detection method and device: CN110261848B [P/OL]. 2021-04-30 [2025-03-08].
- [78] YUAN, W, WEI, Z, YUAN, J, et al. A Simple Variational Bayes Detector for Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) Modulation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, 2020, 69(07): 7976-7980. DOI: 10.1109/TVT.2020.2991443.
- [79] 廖建新, 戚琦, 王敬宇, 等. 6G 智能业务网络: 愿景、架构与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(05): 991-1024
- LIAO J, QI Q, WANG J, et al. 6G intelligent service networking: vision, architecture, and key technologies, 2024, 54(5): 991-1024..
- [80] 陆海涛, 周强, 代九龙, 等. 面向 6G 的天地一体化网络安全技术[J/OL]. 中兴通讯技术, 1-11
- LU H T, ZHOU Q, DAI J L, et al. Integrated network security technology for 6G[J/OL]. ZTE Technology, 1-11
- [81] Singh G, Sandha S K, Kansal A. GA optimized novel design and analysis of graphene-based antennas for THz spectroscopic security applications[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 608: 172454.
- [82] Khan U L, Guizani M, Yaqoob I, et al. A survey on Metaverse-empowered 6G wireless systems: a security perspective[J]. Internet of Things, 2024, 28: 101325.
- [83] Sihag M, Manuja A, Rani S, et al. Synthesis of pyrazole and pyrazoline derivatives of β -ionone: exploring anti-inflammatory potential, cytotoxicity, and molecular docking insights[J]. European Journal of Medicinal Chemistry Reports, 2024, 12: 100204.
- [84] LEI H, ZHAO W, HUANG F, et al. Shell thickness-dependent Au@Ag nanoparticles for surface-enhanced Raman

- man scattering detection of pollutants[J]. Vacuum, 2024, 229: 113577.
- [85] LIU Y, Razman R M, Zakaria S Z S, et al. Utilizing ubiquitous learning to foster sustainable development in rural areas: insights from 6G technology[J]. Computer s in Human Behavior, 2024, 161: 108418.
- [86] Pal A, Roshini A R, Varma M M. De-wetted gold nanostructures for SERS-based sensing of static and dynamic targets[J]. Applied Surface Science, 2024, 678: 161 096.
- [87] 曾勇, 董珍君, 王蕙质, 等. 面向 6G 通信感知一体化的固定与可移动天线技术[J]. 信号处理, 2024, 40 (08): 1 377-1407.
- ZENG Y, DONG Z, WANG H, et al. Fixed and Movable Antenna Technology for 6G Integrated Sensing and Communication [J]. Signal Processing, 2024, 40 (08): 1377-1407.
- [88] 谢泽铖, 张曼君, 徐雷, 等. 6G 网络安全新需求及关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2024, (08): 49-52.
- XIE Z C, ZHANG M J, XU L, et al. Research on New Requirements and Key Technologies for 6G Network Security [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024, (08): 49-52.
- [89] 蒋梦浩. 6G 移动通信: 演变历程、关键支柱技术、新元素及其挑战[J]. 江西科学, 2024, 42 (04): 863-870.
- JIANG M H . 6G Mobile Communications: Evolution, Key Pillar Technologies, New Elements and Challenges [J]. Jiangxi Science, 2024, 42 (04): 863-870.
- [90] 王莹, 袁野, 陈源彬. 面向 6G 的新形态 MIMO 技术[J/O L]. 北京邮电大学学报, 1-12[2024-09-13].
- WANG Y, YUAN Y, CHEN Y B. New modality MIMO technology for 6G[J/OL]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1-12[2024-09-13].
- [91] 刁兆坤, 杨丽, 王振章. 6G 通感算一体化网络关键技术和设计关键点[J]. 通信世界, 2024, (14): 36-39.
- DIAO Z K, YANG L, WANG Z Z. Key technologies and design key points of 6G synsensory computing integrated network[J]. Communications World, 2024, (14): 36-39.
- [92] 王晓云, 陆璐, 刘超, 等. 面向 6G 的网络架构建模、评估及优化[J]. 通信学报, 2024, 45 (07): 235-249.
- WANG X Y, LU L, LIU C, et al. Modeling, evaluation, and optimization of 6G-oriented network architecture [J]. Journal of Communications, 2024, 45 (07): 235-249.
- [93] 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G 星地融合无线网络及关键技术[J/OL]. 中兴通讯技术, 1-11[2024-09-13].
- MIAO D S, DENG L Y, SUN J C, et al. 6G satellite-based fusion wireless network and key technologies[J/O L]. ZTE Technology, 1-11[2024-09-13].
- [94] 黄宇红, 王启星, 李娜. 6G 智简无线网络[J/OL]. 中兴通讯技术, 1-8[2024-09-13].
- HUANG Y H, WANG Q X, LI N. Intelligent and lean 6G network[J/OL]. ZTE Technology, 1-8[2024-09-13].
- [95] 瞿重希, 毛浩斌, 许懂, 等. 面向 6G 的星地融合网络频谱共享技术[J/OL]. 中兴通讯技术, 1-13[2024-09-13].
- QU Z X, MAO H B, XU C, et al. Spectrum sharing technology for 6G space-ground fusion network[J/OL]. ZTE Technology, 1-13[2024-09-13].
- [96] 李静, 李福昌, 张涛. 基于场景需求的 6G 低时延高可靠性性能指标体系研究[J]. 邮电设计技术, 2024, (07): 13 -17.
- LI J, LI F C, ZHANG T. Research on KPI System of 6G Low-latency and High-reliability Based on Demands[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024, (07): 13-17.
- [97] 索士强, 黄远芳, 罗张宇, 等. 6G 无线智能架构设计浅析[J]. 邮电设计技术, 2024, (07): 1-8.
- SUO S Q, HUANG Y F, LUO Z Y, et al. Analysis of 6G Wireless Intelligent Architecture Design [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024, (07): 1-8.
- [98] 承楠, 陈芳炯, 陈文, 等. 6G 全场景按需服务: 愿景、技术与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54 (05): 102 5-1054.
- CHENG N, CHEN F J, CHEN W, et al. 6G omniscenario on-demand services provisioning: vision, technology and prospect [J]. Science in China: Information Science, 2024, 54 (05): 1025-1054.
- [99] 巫松. 智能网络体系背景下高职院校教学改革系统功能优化设计[J]. 网络安全和信息化, 2024, (04): 109-111.
- WU S. Functional optimization design of teaching reform system in higher vocational colleges under the background of intelligent network system[J]. Network Security and Informatization, 2024, (04): 109-111.
- [100] 汪汀岚, 高峰, 吕沛锦, 等. 5G 远端干扰管理功能研究与智能网络优化[J]. 电信科学, 2023, 39 (11): 145-152.
- WANG T L, GAO F, LV P J, et al. 5G remote interference management function research and network intelligent optimization[J]. Telecommunication Science, 2023, 39 (11): 145-152.
- [101] 张鹏, 肖泳, 胡记伟, 等. 联邦边缘智能网络碳排放评估及优化[J]. 物联网学报, 2024, 8 (01): 98-110.

- ZHANG P, XIAO Y, HU J W, et al. Evaluation and optimization of carbon emission for federal edge intelligence network [J]. Journal of the Internet of Things, 2024, 8 (01): 98-110.
- [102] 杨勇. 传输网络智能优化关键技术研究及应用[J]. 长江信息通信, 2021, 34 (03): 207-210.
- YANG Y. The Research and application of key technology on the Intelligent optimization of transmission network[J]. Yangtze River Information and Communication, 2021, 34 (03): 207-210.
- [103] 王友祥, 裴郁杉等. 6G 通感算一体化网络架构和关键技术研究[J]. 移动通信, 2023, 47 (09): 2-10.
- WANG Y X, PEI Y S, et al. Network Architecture and Key Technologies for 6G Integrated Communication, Sensing and Computing [J]. Mobile Communications, 2023, 47 (09): 2-10.
- [104] 马忠贵, 李卓, 梁彦鹏. 自动驾驶车联网中通感算融合研究综述与展望[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 137-149.
- MA Z G, LI Z, LIANG Y P. Overview and prospect of communication-sensing-computing integration for autonomous driving in the internet of vehicles [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2023, 45(1): 137-149.
- [105] 王新奕, 费泽松, 周一青, 等. 面向物联网的通感算智融合: 关键技术与未来展望[J]. 电子与信息学报, 2025, 47: 1-21.
- WANG X Y, FEI Z S, ZHOU Y Q, et al. Integrated Sensing, Communication, Computation, and Intelligence Towards IoT: Key Technologies and Future Directions [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2025, 47: 1-21.
- [106] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. 电信科学, 2022, 38 (03): 37-48.
- DUAN X Y, YANG L, XIA S Q, et al. Technology development mode of communication/sensing/ computing/ intelligence integration [J]. Telecommunications Science, 2022, 38 (03): 37-48.
- [107] SIJIE L, HONGJIANG C, YUEJING L. Research on Legal Liability of Unmanned Driving[J]. Academic Journal of Humanities & Social Sciences, 2021, 4(4): 16-20.
- [108] 蒋杰. 北斗导航卫星系统和 5G 技术在无人驾驶系统领域的应用前景分析[J]. 卫星导航定位与北斗系统应用 2019——北斗服务全球 融合创新应用, 2019.
- JIANG J. Application prospect analysis of Beidou navigation satellite system and 5G technology in the field of unmanned driving systems[C]//China Satellite Navigation and Positioning Association, Satellite Navigation Positioning and Beidou System Application 2019—Beidou Service Global Integration and Innovative Application.,
- [109] ROVIRA A, ABBAS R, SANCHEZ C, et al. Proposal and analysis of an integrated solar combined cycle with partial recuperation[J]. Energy, 2020, 198: 117379.
- [110] KHANDELWAL N, SHARMA M, SINGH O, et al. Recent developments in integrated solar combined cycle power plants[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29 (1): 298-322.
- [111] 陈晋. 智能化无人机视角下隐私权保护的立法因应[J/O L]. 法制与经济, 1-12[2024-09-15].
- CHEN J. Legislative response to privacy protection from the perspective of intelligent UAV[J/OL]. Law and Economy, 1-12[2024-09-15].
- [112] 刘海峰, 吕彩霞, 张楠. 不同集成方案下 ISCC 系统动态性能研究[J]. 热力发电, 2023, 52 (01): 149-157.
- LIU H F, LV C X, ZHANG N. Research on dynamic performance of ISCC systems under different integration schemes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52 (01): 149-157.
- [113] 王刚, 曹勇等. ISCC 分布式能源站的系统设计与初步分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42 (08): 66-70.
- WANG G, CAO Y, et al. Design and Preliminary Analysis of ISCC Distributed Energy System[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42 (08): 66-70.
- [114] 刘涛, 刘金元. 北斗卫星导航系统在无人驾驶领域的应用[J]. 信息通信, 2019, (11): 70-71.
- LIU T, LIU J Y. Application of Beidou navigation satellite system in unmanned Field[J]. Information and Communication, 2019, (11): 70-71.
- [115] HU S, FANG Z, DENG Y, et al. Collaborative perception for connected and autonomous driving: Challenges, possible solutions and opportunities[J]. arXiv preprint arXiv:2401.01544, 2024.
- [116] 段建民, 石慧, 战宇辰. 基于机器视觉筛选 GPS 卫星信号的无人驾驶汽车组合导航方法[J]. 电子技术应用, 2016, 42 (01): 111-114.
- DUAN J M, SHI H, ZHAN Y C. Integrated navigation system for unmanned intelligent vehicle based on vision [J]. Application of Electronic Technology, 2016, 42 (01): 111-114.
- [117] DUAN L, QU W, JIA S, et al. Study on the integration characteristics of a novel integrated solar combined cycle system[J]. Energy, 2017, 130: 351-364.
- [118] 王红霞, 常成. 基于 MPC 的无人驾驶汽车轨迹跟踪研究[J]. 内燃机与配件, 2024, (16): 29-31.

- WANG H X, CHANG C. Trajectory Tracking of Unmanned Vehicle Based on MPC [J]. *Internal Combustion Engine and Accessories*, 2024, (16): 29-31.
- [119] 牛文杰, 伊力哈木·亚尔买买提. 面向无人驾驶场景下的道路多目标检测算法[J]. *计算机应用与软件*, 2024, 41(08): 282-288.
- NIU W J, YILIHAMU Y E M M T. A MULTI-TARGET DETECTION ALGORITHM OF ROAD FOR UNMANNED DRIVING SCENE [J]. *Journal of Computer Applications and Software*, 2024, 41(08): 282-288.
- [120] 刘明霞. 无人驾驶线路列车自动监控系统与综合监控系统集成方案研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(S2): 70-74+78. DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.S2.017.
- LIU M X. Research on the Train ATS and ISCS Integration Solution for Driverless Lines [J]. *Research on Urban Rail Transit*, 2020, 23(S2): 70-74+78. DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.S2.017.
- [121] 熊天圣, 王克斌. 全自动无人驾驶综合自动化系统分析与设计[J]. *现代信息科技*, 2019, 3(14): 93-95.
- XIONG T S, WANG K B. Analysis and Design of Automatic Unmanned Integrated Automation System [J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3(14): 93-95.
- [122] 通感算一体化网络前沿报告[R]. 中国通信学会, 2021年.
- Comprehensive sensing and computing integrated network frontier report[R]. *China Communications Society*, 2021.
- [123] YAO J F, YANG Y, WANG X C, et al. Systematic review of digital twin technology and applications[J/OL]. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 2023. <http://dx.doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>. DOI: 10.1186/s42492-023-00137-4.
- [124] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J/OL]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 1-14.
- [125] ZHUANG C, LIU J, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. *Jisuanji JichengZhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 2017, 23(4): 753-768. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2017.04.010>.
- [126] WEI Z, DU Y, ZHANG Q, et al. Integrated sensing and communication driven digital twin for intelligent machine network[J]. *arXiv preprint arXiv:2402.05390*, 2024.
- [127] YUKUN S, BO L, JUNIIN L, et al. Computing power network: A survey[J]. *China Communications*, 2024.
- [128] 雷波, 刘增义, 王旭亮, 等. 基于云、网、边融合的边缘计算新方案: 算力网络[J]. *电信科学*, 2019, 35(09): 44-51.
- LEI B, LIU Z Y, WANG X L, et al. Computing network: a new multi-access edge computing [J]. *Telecommunication Science*, 2019, 35(09): 44-51.
- [129] 张宏科, 权伟, 刘康. 算力网络研究与探索[J]. *中兴通讯技术*, 2023, 29(01): 1-5.
- ZHANG H K, QUAN W, LIU K. Research and Exploration of Computing Power Network [J]. *ZTE Technologies*, 2023, 29(01): 1-5.
- [130] 杨强根, 王晓蕊, 马维峰, 等. 基于微服务架构的地质灾害监测预警预报系统设计[J]. *地球科学*, 2021, 46(4): 1505-1517.
- YANG Q G, WANG X R, MA W F, et al. Design of Geo-Hazard Early Warning and Forecast System Based on Micro-Service Architecture [J]. *Earth Science*, 2021, 46(4): 1505-1517.
- [131] AKSAKALLI I K, ÇELİK T, CAN A B, et al. Deployment and communication patterns in microservice architectures: A systematic literature review[J]. *Journal of Systems and Software*, 2021, 180: 111014.
- [132] 辛园园, 钮俊, 谢志军, 等. 微服务体系结构实现框架综述[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(19): 10-17.
- XIN Y Y, NIU J, XIE Z J, et al. Review on the Framework for Implementing Microservice Architecture[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(19): 10-17.
- [133] JANG S Y, KOSTADINOV B, LEE D. Microservice-based edge device architecture for video analytics[C]//2021 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). *IEEE Computer Society*, 2021: 165-177.
- [134] MALLIKARJUNARADHYA V, YENNAPUSA H, PALLE R R, et al. Impacts of high density Cloud Computing on Data Protection and Security management for 6G Networking[C]// *IEEE*, 2024: 617-622.
- [135] WANG X, GUO Q, NING Z, et al. Integration of sensing, communication, and computing for metaverse: A survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2024, 56(10): 1-38.
- [136] ZEB S, RATHORE M A, HASSAN S A, et al. Toward AI-enabled nextG networks with edge intelligence-assisted microservice orchestration[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(3): 148-156.
- [137] HE Y, YU G, CAI Y, et al. Integrated sensing, computation, and communication: System framework and performance optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 23(2): 1114-1128.
- [138] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探

- 索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4 (3): 3-19. DOI:10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142.
- SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect [J]. Journal of the Internet of Things, 2020, 4 (3): 3-19. DOI: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142.
- [139] 范珂欣, 安丽荣, 张钦宇. 业务驱动的空天地海一体化网络技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40 (06): 25-37.
- FAN K X, AN L R, ZHANG Q Y. Research on service-driven network technologies for space-air-ground-sea integration [J]. Telecommunication Science, 2024, 40 (06): 25-37.
- [140] 吴晓文, 焦侦丰, 刘冰, 等. 面向 6G 的卫星通感一体化[J]. 移动通信, 2022, 46 (10): 2-11.
- WU X W, JIAO Z F, LIU B, et al. Satellite Integrated Sensing and Communication for 6G [J]. Mobile Communications, 2022, 46 (10): 2-11.
- [141] WANG Y, WANG M, MENG L, et al. New crowd sensing computing in space-air-ground integrated networks[C]//2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). IEEE, 2021: 143-149.
- [142] CHEN Q, GUO Z, MENG W, et al. A survey on resource management in joint communication and computing-embedded SAGIN[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024.
- [143] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合 SDN 控制的新一代空天地一体化网络架构[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10 (05): 450-454+459.
- CHEN C, XIE S S, ZHANG X X, et al. A New Space and Terrestrial Integrated Network Architecture Aggregated SDN [J]. Journal of Chinese Academy of Electronics Sciences, 2015, 10 (05): 450-454 + 459.
- [144] 邓平科, 张同须, 施南翔, 等. 星算网络——空天地一体化算力融合网络新发展[J]. 电信科学, 2022, 38 (06): 71-81.
- DENG P K, ZHANG T X, SHI N X, et al. Computing satellite networks—the novel development of computing-empowered space-air-ground integrated networks [J]. Telecommunication Science, 2022, 38 (06): 71-81.
- [145] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的 6G 通感算融合架构、技术与挑战[J]. 无线电通信技术, 2023, 49 (01): 12-20.
- JING Y, JIANG C X, ZHAN Y F. 6G Communication, Sensing and Computing Integration for Satellite Communication: Architectures, Technologies and Challenges [J]. Radio Communication Technology, 2023, 49 (01): 12-20.
- [146] 李晨玮, 周建山, 田大新, 等. 立体交通系统通感算一体化关键技术[J]. 移动通信, 2024, 48 (03): 14-20.
- LI C W, ZHOU J S, TIAN D X, et al. Key technology of integration of synaesthesia of three-dimensional transportation system[J]. Mobile Communications, 2024, 48 (03): 14-20.
- [147] 沈映春, 张豪兴. 数字基础设施建设对低空经济高质量发展的影响研究[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(05): 96-108. DOI:10.13766/j.bhsk.1008-2204.2024.1146.
- SSHEN Y C, ZHANG H X. Impact of Digital Infrastructure Construction on the High-Quality Development of Low-Altitude Economy [J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics (social science edition), 2024 ((5): 96-108. The DOI: 10.13766 / j.b HSK. 1008-2204.2024.1146.
- [148] FARSAATH K R, JITHA K, MARWAN V K M, et al. AI-Enhanced Unmanned Aerial Vehicles for Search and Rescue Operations[C]//IEEE, 2024: 1-10.
- [149] SONG T, LOPEZ D, MEO M, et al. High altitude platform stations: the new network energy efficiency enabler in the 6G era[C]//2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2024: 1-6.
- [150] 刘壮, 宋祥瑞, 赵斯恒, 等. 进化网络模型: 无先验知识的自适应自监督持续学习[J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (08): 3256-3266.
- LIU Z, SONG X R, ZHAO S H, et al. EvolveNet: A daptive Self-Supervised Continual Learning without Prior Knowledge[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46 (08): 3256-3266.
- [151] 中国移动通信集团有限公司. 低空智联网技术体系白皮书[C]//2024 年世界移动通信大会(上海), 上海, 2024.
- China Mobile Communications Group Co., Ltd. Low-altitude Intelligent Internet Technology System White Paper[C]//. Proceedings of. Mobile World Congress (Shanghai), Shanghai, 2024. Shanghai:
- [152] 中国电信集团有限公司. 通感一体低空网络白皮书[C]//2024 年世界移动通信大会(MWC 2024), 西班牙巴塞罗那, 2024.
- China Telecom Group Co., Ltd. Integrated Sensing and Communication Low-altitude Network White Paper[C]// Proceedings of. Mobile World Congress (MWC 2024), Barcelona, Spain, 2024.
- [153] 广东省通信学会, 中国信息通信研究院, 中国联合网络通信有限公司广东省分公司. 2024 年低空智联网发展研究报告[EB/OL]. 中国信息通信研究院, 2024[2024-06].

Available at: <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg>
Guangdong Communication Society, China Academy of Information and Communications Technology, China Unicom Guangdong Branch. 2024 Low-altitude Intelligent Internet Development Research Report [EB/OL]. China Academy of Information and Communications Technology, 2024 [accessed 2024-06]. Available at: <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg>

- [154] 刁兆坤, 杨丽, 王振章. 6G 通感算一体化网络关键技术和设计关键点[J]. 通信世界, 2024, (14): 36-39. DOI: 10.13571/j.cnki.cww.2024.14.002.

DIAO Z K, YANG L, WANG Z Z. Key technologies and design key points of 6G integrated network of synaesthesia computing[J]. Communications World, 2024, (14): 36-39.

- [155] 金陵, 曾婷, 徐宏, 等. 基于 6G 通感算融合的沉浸式 XR 实践与展望[J]. 移动通信, 2024, 48 (03): 8-13+46.

JIN L, ZENG T, XU H, et al. Immersive XR Implementation and Prospects Based on 6G Integrated Sensing, Communication and Computing [J]. Mobile Communications, 2024, 48 (03): 8-13+46.



刘壮 (1982—), 男, 辽宁省沈阳市, 博士, 副教授, 主要研究方向为金融科技、多模态、机器学习等。

Liu Zhuang, born in 1982, male, from Shenyang, Liaoning Province, Ph.D., associate professor. His research interests include digital twin networks, multimodality, fintech, machine learning, etc.



吴宇赫 (2003—), 男, 江西省南昌市, 本科在读, 主要研究方向为金融科技、感算一体化、数字孪生网络、机器学习等。

Wu Yuhe, born in 2003, male, from Nanchang, Jiangxi Province, Undergraduate. His research interests include ISCC, digital twin networks, fintech, machine learning, etc.



陈雨然 (2005—), 女, 云南省昆明市, 本科在读, 主要研究方向为金融科技、通感算一体化、数字孪生网络、机器学习等。

Chen Yuran, born in 2005, female, from Kunming, Yunnan Province, Undergraduate. Her research interests include ISCC, digital twin networks, fintech, machine learning, etc.

- [156] 彭木根, 刘喜庆, 刘子乐, 等. 6G 通信感知一体化理论与技术[J]. 控制与决策, 2023, 38 (01): 22-38. DOI:10.13195/j.kzyjc.2022.1332.

PENG M G, LIU X Q, LIU Z L, et al. Principles and techniques in communication and sensing integrated 6G systems [J]. Control and Decision, 2023, 38 (01): 22-38.

- [157] 尹浩, 黄宇红, 韩林丛, 等. 6G 通信-感知-计算融合网络的思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53 (09): 1838-1842.

YIN H, HUANG Y H, HAN L C, et al. Thoughts on 6G integrated communication, sensing, and computing networks[J]. Sci Sin Inform, 2023, 53 (09): 1838-1842.

- [158] 周雪, 张子扬, 刘向南, 等. 通信-感知-计算-存储深度融合下的无线资源管控[J]. 移动通信, 2024, 48 (03): 26-39.

ZHOU X, ZHANG Z Y, LIU X N, et al. Wireless Resource Management under the Deep Integration of Communication, Sensing, Computing, and Caching[J]. Mobile Communications, 2024, 48 (03): 26-39.



刘芮彤 (2004—), 女, 山东省莱阳市, 本科在读, 主要研究方向为金融科技、通感算一体化、数字孪生网络、机器学习等。

Liu Ruitong, born in 2004, female, from Laiyang, Shandong Province, Undergraduate. Her research interests include ISCC, digital twin networks, fintech, machine learning, etc.



董晏宁 (2004—), 女, 吉林省辉南县, 本科在读, 主要研究方向为金融科技、通感算一体化、数字孪生网络、机器学习等。

Dong Yanning, born in 2004, female, from Hui-nan, Jilin Province, Undergraduate. Her research interests include ISCC, digital twin networks, fintech, machine learning, etc.



赵军 (1990—), 男, 辽宁省大连市, 博士, 主要研究方向为机器学习等。

Zhao Jun, born in 1990, male, from Dalian, Liaoning Province, Ph.D. His research interests include ISCC, digital twin networks, fintech, machine learning, etc.