

ICDT 融合的 6G 网络 3.0

WHITE PAPER V9.0

2023.03

摘要

信息技术的发展，是一个新技术不断涌现和融合的过程。5G 时代已经完成了信息通信技术（ICT）的融合，在向 6G 演进的趋势中，ICT 进一步与大数据和人工智能技术融合，呈现 ICDT（Information, Communication, big Data Technology）融合特征。

ICDT 融合的 6G 是一个端到端的信息处理与服务系统，是强连接、强算力、强智能、强安全“四强”融合的移动信息网络。大量新技术与新功能成为 6G 设计候选方案，方案性能在理论、仿真和原型等不同层面得到验证。

本白皮书尝试从系统视角对 6G 潜在技术与方案进行分类与集成分析，给出技术体系建议。根据功能特性和定位，6G 技术大致分为无线通信、无线网络、功能架构和系统组网四大方向。其中，无线通信目标提升点对点传输性能，无线网络目标实现多频段多制式、覆盖增强扩展和网络感知能力，功能与架构通过平台化、结构化、服务化和内生设计，实现网络至简和信息流的全过程服务。系统组网目标是实现自生长、自优化、自演进网络运营能力，提升能源和资源效率。

在无线通信与组网方面，通信感知一体化、智能超表面和智能化干扰协调成为热点，也是 5G 增强重点方向。当前，这些技术都已经完成技术方案与原型方案设计，正在开展外场测试工作。在网络架构与功能方面，柔性至简网络、智能内生网络、服务化无线网络、移动算力网络、数字孪生网络、智能网络管理、语义通信成为研究重点。基于熵减网络理论和云化池化基础资源，以服务化和软件定义功能方式设计，可很好的实现通信、算力、智能、业务等多要素融合。

面向未来，ICDT 融合 6G 将进一步向新感知、新终端、新算力、新安全、新低碳、新材料、新仿生、新组网、新设施、新范式跨界融合延伸，为 6G 带来更多创新路径。其中量子计算以其并行计算优越性将对 6G 网络带来颠覆性机遇。

为了 6G 更好的发展，本文倡议在单点技术创新同时，加强系统设计研究和验证；在关注极致性能同时，要以柔性至简、绿色安全为前提；在积极推进 6G 同时，注重与 5G 协同。

Executive Summary

The development of information technology is a process of continuous emergence and integration of new technologies. The 5G era has completed the integration of information and communication technology (ICT). In the trend of evolution to 6G, ICT is further integrated with big Data, artificial intelligence technology, presenting the characteristics of ICDT (Information, Communication, big Data Technology) integration.

ICDT integrated 6G is an end-to-end information processing and service system. It is a mobile information network with strong connectivity, strong computing power, strong intelligence, and strong security. A large number of new technologies and new functions have become candidates for 6G design, and the performance of the scheme has been verified at different levels such as theory, simulation and prototype.

This white paper attempts to classify and integrate 6G potential technologies and solutions from a system perspective, and gives technical system suggestions. According to functional characteristics, 6G technology can be roughly divided into four directions: wireless communication, wireless network, functional architecture and system operation. Among them, wireless communication aims to improve the point-to-point transmission performance, wireless network aims to achieve the capabilities of multi-band networking, enhanced coverage, network sensing, lean network and the full life-cycle information process through platform-based, structured, service-oriented and biochemical design. The goal of system networking is to achieve self-growth, self-optimization and self-evolution of network operation capabilities, and improve energy and resource efficiency.

In terms of wireless communication and networking, the integrated sensing and communication, reconfigurable intelligent surface and intelligent interference coordination have attracted much attention, and are also the key directions of 5G enhancement. At present, these technologies have completed the design of technical solutions and prototype solutions, and are undergoing field testing. In terms of network architecture and functions, lean network, intelligent native network, service-based wireless network, mobile computing network, digital twin network, intelligent

network management, and semantic communication have become the research focus. Based on entropy reduction network theory and cloud pooling of basic resources, the integration of communication, computing, AI, service and other elements can be realized in a service-based and software-defined way.

ICDT integrated 6G will further extend to the cross-border integration of new sensing, new terminals, new computing, new security, new low-carbon, new materials, new bionics, new networking, new facilities and new paradigms, bringing more innovative paths to 6G. Among them, quantum computing with its advantages of parallel computing will bring subversive opportunities to 6G networks.

For the better development of 6G, this paper proposes to strengthen the research and verification of system design, as well as the individual technological innovation. We should not only pay attention to the ultimate performance, but also take flexibility, simplicity, green and security as the premise. While actively promoting 6G, we should pay attention to cooperation with 5G.

摘要	01
Executive Summary	02
1 引言	06
2 ICDT 融合的 6G 技术体系	06
2.1 总体技术体系视图	06
2.2 无线通信技术簇	07
2.3 无线网络技术簇	07
2.4 功能与架构技术簇	07
2.5 系统组网技术簇	08
3 ICDT 融合的无线通信与组网	09
3.1 通信感知一体化技术	08
3.1.1 基本概念	08
3.1.2 关键技术	08
3.2 协作反射节点（智能超表面）	09
3.2.1 基本概念	09
3.2.2 关键技术	10
3.2.3 技术挑战	10
3.3 智能化自主干扰协调	11
3.3.1 技术概述	11
3.3.2 技术建议	11
4 ICDT 融合的架构与功能	12
4.1 柔性至简网络	12
4.1.1 基本概念	12
4.1.2 技术挑战	13
4.1.3 技术建议	13
4.2 智能内生网络	13
4.2.1 基本概念	13
4.2.2 关键技术	14
4.2.3 技术挑战	14
4.3 服务化无线网	14
4.3.1 基本概念	14
4.3.2 关键技术	15

4.3.3	技术挑战·····	15
4.4	无线算力网络·····	15
4.4.1	基本概念·····	15
4.4.2	架构设计·····	16
4.4.3	关键技术·····	17
4.5	数字孪生网络·····	17
4.5.1	基本概念·····	17
4.5.2	架构设计·····	17
4.5.3	技术挑战·····	18
4.6	语义通信·····	19
4.6.1	基本概念·····	19
4.6.2	关键技术·····	20
4.6.3	技术挑战·····	20
5	ICDT 融合的技术趋势·····	21
5.1	跨界融合技术趋势·····	21
5.2	量子计算及应用·····	21
5.5.1	结束语·····	22
致 谢		23

1. 引言

信息技术发展日新月异。融合信息技术、通信技术、人工智能与大数据技术、系统控制技术和数字孪生技术的 6G 技术持续发展。2020 年 11 月全球 6G 大会上，《ICDT 融合的 6G 网络》白皮书 1.0 正式发布，指出 6G 将是一个端到端的信息处理与服务系统，其核心功能将从信息传递扩展到信息采集、信息计算与信息应用，提供更强的通信、计算、感知、智能和安全等多维内生能力。2022 年 3 月全球 6G 大会上，《ICDT 融合的 6G 网络》白皮书 2.0 发布，在 1.0 版本基础上，聚焦感知、通信、计算融合的网络能力、架构、空口、终端和产业，提出了 6G 新方案。

近一年来，6G 内涵和定位在不断延伸，呈现 ICDT（Data, Operation, Information, Communication Technology）融合趋势，强连接、强算力、强智能、强安全“四强”能力特征更加显著。

目前，6G 技术发展正从多点技术向重点技术聚焦，系统方案设计和原型验证工作成为重点，IMT-2030 工作组启动了关键技术原型样机室内室外测试工作。同时，产业已经开始在 3GPP 5G-A 中对部分准 6G 技术开展标准化工作。中国移动和华为牵头发起 6GANA（全球的网络智能交流平台），倡导全球 6G 统一标准，已涵盖产学研超 31 家单位，已经在智能网络架构层面提出多项解决方案。

基于 6G 的最新进展，本次 FuTURE 论坛 6G 工作组牵头完成了《ICDT 融合的 6G 网络》白皮书 3.0 版本，重点介绍 ICDT 融合的 6G 技术体系，ICDT 融合的无线通信与组网，ICDT 融合的架构与功能，简要探讨 ICDT 融合的技术趋势，给出 6G 发展倡议。

2. ICDT 融合的 6G 技术体系

2.1 总体技术体系视图

面向 6G 总体技术愿景，从 6G 系统设计角度看，6G 新技术根据功能特性和定位可分类为无线通信、无线网络、功能与架构和系统组网四大方向。其中，无线通信定位在点对点通信，目标是提升频谱效率、峰值速率和接入用户数。无线网络定位在多点对多点组网，目标是支持多频段多制式、拓展微域和盲区覆盖能力和网络感知能力。功能与架构定位在信息通信网络架构理论体系，通过平台化、结构化、服务化、内生设计等技术手段，实现网络至简和结构熵减，以及与 5G 的平滑代际演进和前后双向兼容。面向全场景，融合全要素，实现全领域资源和能力贯通，实现信息流的全过程服务。系统组网定位在贯通物理和数字空间，在系统层面实现自生长、自优化、自演进。向集中 + 分布协同转变，按需扩展，即插即用，实现柔性网络组织。端到端系统节能，提升能源和资源利用率。网业融合，实现能力内化与开放共生。



图 1 6G 技术体系

2.2 无线通信技术簇

无线通信重点解决新频谱、新天线技术的系统化集成问题，重点技术包括大规模智能无线传输和超高频段通信两个技术簇。前者以超大规模 MIMO、虚拟 MIMO、新型多址接入、协作无源节点（如智能超表面）和空口 AI 为技术组件，构建智能化多天线空口方案。后者以可见光通信和太赫兹通信为主，提供超高速率传输方案，峰值速率目标至少 100Gbps。

2.3 无线网络技术簇

无线网络技术重点解决多技术、多频段、多功能无线组网和覆盖问题。重点包括多维异构融合组网和网络协作通信感知技术两个技术簇。前者包括中低频段、毫米波、太赫兹和可见光等多频段融合组网、地面与卫星融合组网、5G/6G 短距离通信等多制式融合组网、蜂窝网和无蜂窝融合组网，以及微域通信（微覆盖）等技术。后者包括多维干扰协调管理、分布式 MIMO 和网络协作感知等技术。

2.4 功能与架构技术簇

6G 功能与架构重点解决 6G 总体架构与内生功能设计问题，重点包括平台化服务化网络和全要素融合网络两个技术簇。前者包括熵减网络理论、全服务化网络（服务化核心网和接入网），柔性至简网络等技术，后者包括内生 AI 网络、内生安全网络、移动算力网络、6G 空天地一体化网络等。多种功能融合设计，形成功能耦合，带来系统架构设计难度。基于云化池化基础资源，以服务化和软件定义功能方式设计，是一种可行思路。

2.5 系统组网技术簇

系统组网重点解决端到端网络运营问题，包括网络管理、业务管理、运维和能力开放等，重点技术包括全域自治网络和高能效运维两个技术簇。前者包括网络智能化、数字孪生网络和分布式自治网络等技术组件，后者包括信息能源融合技术、网业融合（如语义通信）、网管与编排、能力开放等技术。

3. ICDT 融合的无线通信与组网

3.1 通信感知一体化技术

3.1.1 基本概念

未来，6G 网络将具有无时无刻、无处不在感知物理世界的基础能力，旨在通过频谱资源共享、一体化空口与硬件架构等设计实现通信感知一体化，支撑网络具备通信与感知能力，提升频谱和硬件资源利用率。其中，网络协作通感利用网络中规模部署的分布式节点，通过多点协作与信息交互，促进通与感深度融合。

3.1.2 关键技术

1) 空口融合技术

一体化波形设计：新型通信感知一体化波形联合设计需同时考虑通信和感知性能的折中，还要尽可能降低与硬件适配的复杂度。

帧结构设计：依据业务优先级与业务量需求，灵活配置符号类型，同时满足感知辅助通信与通信辅助感知业务场景的需求。

参考信号设计：单节点感知可复用数据信号，网络协作感知则需设计 PAPR 较低的参考信号，并进一步设计灵活的信号映射方式，以满足多样的感知需求。

波束赋形与波束管理：波束赋形可实现对准目标定向传输与精准感知，但感知的波束扫描过程开销较大，因此，合理的波束管理方式可优化一体化系统性能。

2) 网络融合技术

多频点协同：综合考虑低中高多频段的衰落特性、通信能力、感知能力等，构建各频段互补与增强的全频谱融合通感网络，实现广覆盖探测与微观精准感知。

节点间同步：协作通感网络中，收发节点异步引入的误差不可忽略，需要从系统性能、复杂度等角度出发，设计降低或避免同步误差的系统方案。

组网干扰协调：网络协作通感打乱了传统的同频部署，额外引入交叉链路干扰等，可从组网资源配置及协调调度的角度，优化各协作节点的时隙配置方式。

信号联合处理：多节点信息联合处理可获得联合处理增益，考虑频段、带宽和发送功率对感知精度和范围影响的同时，还要兼顾系统通信业务量的要求。

3) 硬件架构设计

对于单节点感知，发射机可通过空口联合设计实现硬件一体化，但同时收发模式会引入自干扰，且需要依赖于全双工能力实现。然而，全双工器目前仍处于研究阶段，未来需要综合考虑全双工技术的成熟度进行硬件架构设计。

3.2 协作反射节点（智能超表面）

3.2.1 基本概念

智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）是由成百上千个器件单元组成可调器件阵列，通过数字可编程的控制模块动态或半静态地控制每个器件单元的工作状态，以实现无线信号的不同响应模式，从而实现对电磁波传播环境的重塑。智能超表面具有低功耗、低成本、低热噪、全双工等优势，部署在无线传输环境中的物体表面，将传统不可控的无线信道重构为智能可编程无线环境，引入未来无线通信的新范式。智能超表面可以作为反射节点应用于移动通信网络中，并且需要基站根据信道状态、通信目标、调度请求等因素与其进行协作交互，进而实现覆盖增强和容量提升等网络性能的提升。因此，又将上述应用场景中的智能超表面成为协作反射节点。

3.2.2 关键技术

在系统方案方面，存在协作反射节点的通信系统架构包括一个新节点和两个新链路。对于该新节点，即协作反射节点，需要定义网元能力、波束赋形方法等。网元能力包括对电磁波的调控类型（反射或透射），调控所需要的时间，阵列排布等。波束赋形具体实现会影响控制和传输方案的设计，以及码本的设计，例如，基于信道信息的波束赋形需要重新设计 CSI 的获取方法，基于波束扫描的方法需要对 RIS 引入的大量额外波束进行指示索引等。对于两个新链路，一是基站到 RIS 的控制链路，该接口协议需要进一步设计，而无线的控制接口有利于实现 RIS 的灵活部署；二是基站和终端经过 RIS 的数据和信令传输链路，该链路又分成入射链路和反射链路，需要进一步考虑 RIS 的引入对现有空口协议的影响，重新设计传输方案，例如随机接入过程、波束管理过程、信道状态信息获取过程等。

在信道模型方面，RIS 单元结构数量大，且需要额外考虑近场传播模型，但近场模型更为复杂多变，建模和测量难度都更大。目前仅有部分研究机构对 RIS 信道模型展开了初步研究，需要进一步在实际传输环境下的建模与测量结果。

在组网部署方面，当前 RIS 尚不具备针对特定频点的滤波能力，因此需要评估和研究同频和邻频干扰问题，以及运营商间的干扰协调和组网部署问题。需要研究在无线同构网络内或在无线异构网络内 RIS 网络拓扑结构及部署方案。需要研究网络环境中同小区 / 异小区中多个 RIS 之间的协作问题。

在硬件特性与结构设计方面，通过电磁仿真研究，目前发现单极化 RIS 仅对一种极化方向的来波进行响应，对其他极化方向的来波进行镜面反射。基于该问题，可以研究双极化 RIS 的结构设计。

3.2.3 技术挑战

目前智能反射面在硬件实现和工程部署、理论和方案设计、控制方案和网络架构三方面还面临着严峻的挑战。

1) 硬件实现和工程部署。RIS 的硬件实现和工程部署受规模、价格、部署难度等因素制约。在硬件实现方面，RIS 材料和器件成熟度不高但成本较高；可调器件性能难以满足调控需求、结构设计待优化；受可调器件调控速率的限制，目前的高频段 RIS 中继还未实现动态调控；RIS 工作带宽受限，能量转换效率低，难以支持远距离覆盖和大带宽传输。在工程部署方面，由于 RIS 面板尺寸较大，部署需与物业、业主沟通，存在风阻大的问题；馈电需求会限制 RIS 的部署，并且馈电需求可能存在弱电干扰。

2) 理论和方案设计。目前仍缺乏可靠完善的传输理论基础、信道模型和系统模型，无法为 RIS 系统传输方案设计提供有力的理论支撑。现有空口传输相关方案复杂度高、开销大、可行性受限。因此，首先需要一套

完善可信的、综合考虑非理想因素的系统实际性能评估体系；然后，考虑性能和复杂度折中，设计可实现的信道估计和联合波束赋形等基本空口传输方案。除此之外，RIS 能否支持子带调度方案，高低频阵子相位调节速度是否足够快都有待进一步的研究。

3) 控制方案和网络架构。RIS 的控制方式对网络架构设计、功耗和部署方式会产生重要影响，需要考虑功耗和网络复杂度的折中，真正实现无源 / 半无源和动态控制。在组网方面，在多带宽、多制式的通信模式下，RIS 是否可以获得性能增益，以及如何设计传输方案等方面还有待进一步的评估和研究。

3.3 智能化自主干扰协调

3.3.1 技术概述

干扰管理技术始终是保证无线通信质量的关键技术，如面向 4G 的 ICIC、eICIC 技术，网络编码、干扰迁移、多点协同传输等干扰管理技术，面向 5G 的干扰对齐、干扰消除、干扰随机化等智能抗干扰技术。网络干扰优化方法从传统的数学建模优化等模型驱动优化发展到当前的基于强化学习等 AI 算法的数据驱动优化。面向未来 6G 超大规模用户接入、超高致密异构网络的网络架构和超高带宽、超低时延、超高可靠性的新型业务需求，结合 6G 网络 AI 内生、通信感知一体化的演进特性，亟需研究基于 AI 的新型网络干扰管理技术和相应的问题优化方法，建立数据与模型双驱动的干扰智能管理决策和优化，对实现 6G 复杂网络的进一步干扰抑制和满足 6G 网络的新型 QoS 要求具有重要意义。

3.3.2 技术建议

1) 智能匹配自适应统一干扰管理理论研究。当前对网络干扰管理的研究多是针对不同网络结构和不同通信技术下的单一干扰管理优化，虽然通过分析不同场景下多种维度的干扰特征，提出了多种模型或数据驱动的干扰管理方法，但在针对网络场景日趋复杂和多样化的干扰管理方法智能自适应最优选择方面的研究还很缺乏。因此面向 6G 新型大规模异构接入网络特征，可通过基于随机几何理论进行网络场景的高精建模，基于网络协同感知技术进行网络多维参数以及干扰环境的感知，基于数据融合和特征提取算法获得干扰在空间上的分布以及干扰的结构特征，进而将这些信息映射成为干扰的状态特征；研究智能匹配统一干扰管理决策模块，该模块包括干扰管理机制资源库和干扰管理动作策略。干扰管理机制资源库中包括了可采用的干扰管理方式，根据干扰的状态特征，基于可采用的干扰管理方式，通过智能算法，产生一个融合的干扰管理动作策略，并且对采用该动作策略后网络的性能进行预测。干扰决策模块根据当前网络性能和预测网络性能之间的差异以及网络和干扰的状态，通过自学习的算法，调整干扰管理策略，从而实现智能匹配网络干扰状态特征的自适应统一干扰管理。

2) 面向 AI 融合大规模用户协同接入网络架构的群智干扰优化。当前基于数据和模型优势互补双驱动的干扰管理方法方面也存在不足。因此，为突破传统模型或数据单一驱动的干扰管理方法，综合利用线上无线干扰环境的数据库和线下原型系统实际采集的无线干扰数据库，面向 6G 满足大规模用户接入的高异构网络特征，基于知识图谱技术建立网络多维参数和网络干扰水平的相互关联和制约关系模型，建立如信号空间、时频资源、网络节点的空间分布等多维网络资源与网络干扰状态特征之间的相互关联和制约机理，挖掘复杂网络下的多维度干扰特征，提出结合模型的多智能体学习算法，以实现面向 AI 融合大规模用户协同接入网络架构的群智干扰优化。

3) 基于干扰洼地 / 空洞感知的自主式干扰避免传输。通过对基站和 UE 的相关空口参数的采集，构建时频空域的大尺度三维空间干扰分布特征以及基于虚拟栅格的无线指纹地图。利用建立的无线指纹地图表征无线干扰环境，智能感知 UE 的干扰情况。干扰检测可首先通过获取基站服务状态数据，针对基站、用户中协议栈各层参数，如频率占用情况、负荷开销、流量负载、邻区发送功率、射频指纹等，构建基于虚拟栅格的无线指纹地图；根据无线指纹地图，构建 AI 模型和统计干扰参数，实现用户秒级别的近实时干扰检测；然后根据虚拟栅格进行干扰源定位；最后，利用干扰检测和干扰源定位的结果，优化基站配置，实现基于干扰洼地 / 空洞感知的干扰避免传输。

4. ICDT 融合的架构与功能

4.1 柔性至简网络

4.1.1 基本概念

柔性指网络提供灵活按需的功能和服务，满足定制化的行业需求，至简指设计统一的网络架构和协议框架，破解网络中的约束关系。柔性和至简相结合，构建网络与业务深度融合的 6G 网络。柔性至简网络的设计包含面向用户、面向业务和面向运维多个维度。

面向用户的柔性至简。在 6G 网络中，多层不规则覆盖范围的站点异构密集混合组网方式取代了传统的单层单基站类型的组网方式，这使得接入点密集、类型繁多，接入方式灵活，去蜂窝化趋势明显，传统蜂窝架构以网络为中心的管理控制方式不再适用，面向用户的至简成为了重要的研究方向。

面向业务的柔性至简。未来 6G 时代将对网络的业务质量保障提出了更多的极致要求，如何做到按需服务提升业务的适应性，使空口能力和业务需求相结合的 QoS 保障是无线侧 QoS 保障的核心问题。

面向运维的柔性至简。由于泛在的连接、海量的信息处理、多种的接入技术和复杂的网络拓扑导致网络运维难度越来越大，运维人员需要面对的参数越来越多，会严重影响运维的复杂度。如何将复杂的运维问题简化、提高运维效率是柔性至简网络面临的重要问题。

4.1.2 技术挑战

柔性至简网络需要考虑的核心问题是“柔”和“简”的平衡。随着业务需求的日益增加，网络的设计也必然需要越来越灵活，但是灵活性和网络的复杂度是两个相互影响的指标，过高的灵活性通常是以提升的网络的复杂度为代价。如何构建一套统一的技术体系在不过多提升网络内部复杂度的情况下，提升网络的弹性是该方向面临的主要挑战。

4.1.3 技术建议

面向用户的柔性至简网络：用户侧体验要更简洁灵活。在网络设计时要简化网元关系、统一架构设计，通过多级控制减少信令路径长度和条数，通过 MAC 增强设计实现多空口统一调度。

面向业务的柔性至简网络：6G 网络需要解决现有“三大场景”的设计思想与更多样、更多维的业务需求之间的矛盾。将业务特征内化到无线 QoS 体系，按需服务提升业务的适应性，根据网络状态调整网络能力，敏捷适配新需求新场景，提升资源利用率。

面向运维的柔性至简网络：6G 网络需遵循网络能力和需求相一致原则，采用即插即用的方式保证网络的按需灵活扩展，面向 5G 到 6G 的平滑兼容，实现网络以建促用、边建边用、以需促建。

4.2 智能内生网络

4.2.1 基本概念

6G 网络内生 AI 是在 6G 网络架构内部提供数据采集、数据预处理、模型训练、模型推理、模型评估等 AI 工作流全生命周期的完整运行环境，将 AI 服务所需的算力、数据、算法、连接与网络功能、协议和流程进行深度融合设计，支持将 AI 能力按需编排到无线、传输、承载、核心等，能够通过对用户以及网元需求的感知进行自我设计、自我实施、自我优化、自我演进，为高水平网络自治和多样化业务需求提供智能化所需的基础能力。另一方面，6G 智能内生网络能够在各个环节嵌入安全能力，实现自主检测威胁、自主防御。同时，网络智能化还能提供智能化的服务能力。总之，6G 智能内生网络的设计理念即是网络原生支持智能服务，让智能体现在部署、运行、维护等诸多方面，成为网络内生的特征。

4.2.2 关键技术

6G 网络将支持智能内生,要求移动通信网络不仅是传输管道,更要成为一个连接与计算能力兼具的智能平台,这依赖于通信、算力、数据和存储一体化协作和多维资源联合调配,将智能服务所需的多维资源与网络功能、协议和流程进行深度融合设计。考虑云计算节点与分布式网元节点间多维异构资源的集中分布式混合特征以及智能服务对性能的差异化需求,研究异构网元节点间资源高效灵活协作模式,以保障智能服务的质量。与此同时,现网部署时使用的时延、吞吐量、信噪比等传统 QoS 指标难以精确表征 6G 网络中智能服务的质量,需要综合考虑智能服务对通信、计算、数据和存储资源不同需求研究面向 QoAIS 的建模表征与性能评估方案。6G 网络将新增数据面、智能面、计算面,并产生维度大幅扩展的控制面和用户面。其中,智能面提供内生 AI 全生命周期所需的完整运行环境,调用数据面、计算面提供的服务,为其他层和面提供智能服务。智能面架构具有如下技术特征:一是 AI 用例的自生成和导入;二是 QoAIS 的生成,一个 AI 服务对应一套 QoAIS;三是 AI 工作流全生命周期承载于网络内部;四是管理面、控制面和用户面协作保障 QoAIS 的持续达成;五是 AI 集中式与分布式架构相结合,兼顾到各种智能应用场景的性能需求。

4.2.3 技术挑战

未来 6G 网络中,多维资源广泛分布在空天地环境中大量的异构网元节点中,如何针对多维资源不均匀分布研究编排管理方案是一个挑战。此外,不同行业和场景中的智能服务对 6G 网络的需求千差万别,部分 QoAIS 指标尚无成熟的量化评估方式,提出能够精确描述个性化智能服务的差异化需求的指标,指导智能内生网络部署是一个挑战。

将管理面计算与通信的融合机制与控制面计算与通信的融合机制有效的结合起来是一个巨大的挑战。同时,仅依靠管理面对工作流所需资源进行编排可能难以保障 AI 服务的 QoAIS 持续达成。因此需要考虑是否需要控制面的参与,以及管理与控制如何协同和区分的问题。

4.3 服务化无线网

4.3.1 基本概念

目前 5G 已经实现了核心网控制面的服务化改造,随着服务化 RAN 和服务化 CN 研究的推进,未来 6G 系统将实现端到端全服务化架构,以提升网络对于全场景的适应能力。基于云原生技术的 6G 服务化 RAN,旨在将传统集成式的单体基站解耦为控制面与用户面服务,通过服务化接口实现功能服务之间的交互与能力开放,以按需组合的方式提供更灵活的服务能力。此外还可以将接入网能力逐层级封装和开放,为客户提供不同形式与能力等级的集成服务。

4.3.2 关键技术

为更好的形成符合云原生原则的端到端服务化网络，服务化 RAN 的研究包括 RAN 控制面与用户面基本功能的服务化设计，以及对于多维能力的引入，例如 AI、感知、计算等，并且随着网络服务化改造的深入还可能扩展到终端服务化。

具体地，RAN 控制面的关键研究内容例如接口服务化方案，将 N2 接口进行服务化改造，以实现接入网与核心网服务之间的直接调用，减少冗余信令；RAN 与 CN 的服务融合，设计轻量化的服务调用流程，进一步实现端到端的信令流程设计；以及多维能力的服务化，通过 RAN 与第三方服务之间的服务化接口定义，实现网络对多维能力的快速引入与部署。对于 RAN 用户面，传统的 RAN 用户面遵从 OSI 分层协议设计理念，无法实现灵活的跨层信令交互及跨层功能组合。RAN 用户面的服务化突破传统分层协议设计理念，使得功能模块之间可以灵活调用，其调用关系不再受限于上下层协议关系。将 RAN 的用户面功能合理地拆分重构为多个 RAN 用户面服务，并按需灵活组合。具体地，RAN 用户面服务化研究包括：用户面服务的拆分重构、服务化接口设计开发以及用户面数据的处理顺序等。

4.3.3 技术挑战

传统 RAN 的固有局限性，以及新技术引入带来的新问题，给服务化 RAN 的研究带来了挑战。一是服务的拆分定义，不合理的服务拆分很可能会构建出一个分布式单体应用，把单体架构和微服务架构两者的弊端集于一身；二是服务化带来的网络能效问题，服务化 RAN 的实现大部分将基于通用芯片，其优势是成本低，灵活性高，但与此同时也会带来处理效率低，功耗高的问题；三是测试运维，开放的接口会带来更加复杂的处理机制，部分接口还需定义全新规范的信令流程，增加了整体的设备复杂度和系统集成的难度。此外，成本优势短期不显著、目前的标准化方式与服务化 RAN 的快速开发部署需求不适配以及服务化 RAN 带来的相应的网络安全问题也需要进一步的研究与考量。

4.4 无线算力网络

4.4.1 基本概念

目前移动通信网络架构都以满足无线通信系统的基本功能、网络实时性和稳定性要求为设计目标，通用计算资源非常有限，尤其在高业务负荷场景下，通信处理计算量较大时，难以为无线侧部署的数据分析和 AI 计算等智能化功能提供稳定、持续的计算和存储资源。未来面向智能服务的演进，同时云化 5G 网络和分布式计算等技术的日益成熟，网络将连接云、边、端，边缘算力将成为支撑智能服务的重要环节。未来无线网络

融合边缘算力构成边缘智能服务的基础，基于内生 AI 能力，统一协同调度网络、存储、算力等多维资源，实现连接和算力在网络边缘的融合供给，构建“连接 + 计算 + 智能”的无线算网一体架构和技术体系，打造无线算网服务能力。

4.4.2 架构设计



图 2 移动算网架构

无线算网架构具体包括四层，异构资源层、网络功能层、智能决策层和服务应用层。其中异构资源层是网络连接、频谱、算力和存储等多维在网资源的基础设施提供者。网络连接资源包括为网络各角落提供无处不在在网络连接的路由、传输和交换资源；频谱资源主要包括负责无线接入的无线频谱资源；计算资源包括 CPU、GPU、NPU 等以计算能力为主的处理器，以及通过操作系统逻辑化的各种具备数据处理能力的设备；存储资源包括各类独立存储或分布式存储设备。异构资源层依托于虚拟化、云化技术发展，向上层提供抽象的资源视图和调用接口，实现资源的融合和共享。

网络功能层在 3GPP 对无线接入网定义的基础上进行了功能延伸，包括原有的控制面和用户面，增加了感知面、数据面、智能面和系统整体的安全功能。网络功能层可以将一种或者多种网络功能组合在一起形成特定的网络功能，以满足不同应用和服务的需求。智能决策层主要包括智能连接、智能配置、智能编排和智能管理，通过对多维在网资源的实时监控、融合调度、联合编排、以及对各种任务实力的全生命周期的实时管理和控制，智能连接和智能配置通过对于需求服务的映射，利用合理的任务编排，实现服务和业务功能需求的最优匹配。服务应用层包括连接服务、算力服务、功能定制和能力开放，服务应用层通过对系统能力的抽象、

封装和组合，以统一的服务化接口向终端客户和其他用户提供各类业务的服务接入，也能针对特定客户提供定制化的业务服务，同时将各类业务需求下发给智能管理层或对应的业务功能。

随着分布式云的快速发展，资源和数据处理将加速由云端向边侧、端侧扩散，网络正在经历从最开始单纯提供“端到端”的通信服务，到“云到端”的内容服务，再到“端 - 边 - 云”协同的智能服务的转变。

4.4.3 关键技术

未来 6G 通信资源与计算的深度融合包括以下两个方面的关键技术研究。一是新的计算面、智能面的引入，为无线网络架构带来重构的必要性，需要明确相应的接口、适用流程，以发挥无线算力网络在性能、智能化服务等方面的优势。同时为了支撑无线算力网络的实现，协议栈可能会简化，为任务型业务提供高性能的解决方案，如用户与位于计算面的 POD 或容器直接建立连接，不再通过传统的基站与核心网的数据连接方式。还包括 AI 算法的设计与部署，无线算力网络需要 AI 辅助兼顾通信、计算及存储资源的开销与性能。二是在网管层面，网络和算力需统一编排，包括异构算力的支持、算力与业务的泛在调度，以及网络智能化管理运维，包括针对不同应用场景进行智能化的推理、优化、验证，从部署、运维到故障分析与决策实现网络的自动化。

4.5 数字孪生网络

4.5.1 基本概念

数字孪生网络即通过对网络本身进行数字孪生构建孪生的数字化网络，为实现 6G 网络高水平自治提供了新的技术思路和解决方案。数字孪生网络是一个由物理网络实体及其孪生的数字化网络构成的，且物理网络与孪生的数字化网络间能进行实时交互映射的网络系统。它通过构建物理网络的数字化镜像，精细化复制网络和设备的全流程，可以为网络运维优化操作和策略调整提供接近真实网络的数字化验证环境，实现低试错成本与风险的预验证，同时其自主构建和扩展的能力可以实现新业务的需求探索与效果验证。从而可以帮助 6G 无线网络自优化、自演进和自生长。

4.5.2 架构设计

6G 数字孪生网将呈现集中式与分布式相结合、分层跨域的架构。局部网元的数字孪生体及其功能可支持局部或单一网元的自治需求，有利于数字孪生体按需就近生成，降低数据采集与传输压力，保护设备数据隐私。无线网络的数字孪生平台则存储了无线网络级数字孪生体及其功能，可支持广域或网络级自治需求，可支撑全局业务优化。

在此基础上，面向 6G 无线网络自治需求，数字孪生网络中的资源对象具有“三体”和“五态”，并通过“双闭环”实现持续的优化，组成了“三层三域双闭环”的整体架构。为了满足 6G 无线网络自治的需求，网络需要内闭环和外闭环结合来实现“三体”之间的联动。

对象的物理实体和数字孪生体是数字孪生技术中普遍提到的概念，而数字规划体则是基于网络自治特点提出的新概念。数字规划体代表了在网络自治场景下数字域的决策内容和结果，是数字孪生体与物理对象保持同步的目的，体现了数字孪生网络的决策智能水平，是构成网络自治闭环中的重要环节。当前，各行业数字孪生系统的构建主要关注在上行方向上，物理对象与其数字孪生体之间同步的实时性和精准度，而在下行方向上，数字规划体实施至物理对象的时延、准确度和性能抖动也直接影响网络自治效果。“三体”之间的关系为数字孪生体是物理实体状态的映射，网络根据数字孪生体及相关数据，生成数字规划体，按照数字规划体对物理实体进行优化调整。

不同于当前网络中相互割裂的规、建、维、优各阶段，6G 网络设备从供货到退服的所有状态均在数字孪生网络的管理中。为了区分设备在生命周期不同阶段与孪生的数字化网络的不同关系和技术需求，同时为了兼容不支持数字孪生的现有网络设备，提出了五种状态的设计方案：起始态、规划态、服务态、孪生态和节能态。网络在架构方面需具备完整的自治闭环，以及平台级、分布式算力，以实现分层分域的多级闭环自治。标准化和行业组织中提到的自治闭环一般包括观察、分析、决策和执行四个环节。在数字孪生网络中，数字孪生体通过同步物理网络状态实现了“观察”，数字规划体对应了“决策”结果，物理实体是“执行”的对象。对于“分析”环节，由于数字孪生网络具备高拟真度的数字化网络环境，能够验证决策效果，为在数字域进行决策的闭环优化提供了可能，使得“分析”环节本身成为了一个闭环过程。

4.5.3 技术挑战

作为基于规模庞大的通信网络构建的复杂系统，数字孪生网络在数据、模型和架构方面存在多项需要攻克的技术难题。在数据方面，数据隐私保护，异厂商数据的兼容性、以及如何针对不同网络自治场景设计数字孪生体和规划体模型并保证数据质量是需要思考的问题；在模型方面，不同类型的模型如何互通互联，如何利用多种模型对数字孪生体精准度进行校正，仍需进一步研究；在架构方面，如何实现按需定制、动态生成的数字孪生体和规划体，如何根据局部 / 网元的数字孪生体构建全局 / 网络的数字孪生体，以及如何实现预验证意图的自解析和流程的自编排，以满足不同网络自治场景的性能需求（如实时性、精准度等）需要业界一同探索。

如何构建全网通用的智能数字孪生体，形成泛化能力高，迁移能力强的孪生网络。尽管网络的数字孪生体在部分现网中已经得到应用，然而这类孪生体往往是依据大量专家知识和特定领域背景构建的，通用性较差，

往往只能适合网络环境中特定的物理或逻辑区域。如何充分利用无线网络大数据，知识图谱和人工智能构建无线网络元模型和元算法，形成泛化能力强，可迁移到多种无线网络环境的网络数字孪生体。

如何实现虚拟网络场景生成的可控性，提高数字孪生网络增广数据和预验证结果的可靠性。虚拟网络场景旨在模拟实际网络性能，需要建立其性能评估体系和调控机制。此外，数字孪生网络还需要能够产生基于特定条件下的增广数据和预验证结果，从而实现特定意图驱动的自定义场景的仿真。

如何提高真实无线网络数据的使用效率，降低数字孪生网络建模的成本。考虑到真实无线网络数据采集成本，数字孪生网络应当尽可能降低训练所需的样本数量，但是小样本会导致数字孪生网络无法匹配实际场景，因此需要平衡有效性和复杂度的关系。

4.6 语义通信

4.6.1 基本概念

香农和韦弗指出，通信包含语法层、语义层和语用层三个层次。语义通信很早就与语法通信同步提出，但受技术水平和场景需求限制，人们更多精力放在语法通信。时至今日，语法通信已经逼近香农极限。随着人工智能技术的发展，以及 6G 面向智能体通信的需求增长，语义通信再次成为热点技术。

经典信息论在语法层面解决信息符号的无差错传输，把信息内容理解环节交给了接收者自身。语义通信是一种以语义表征信息并传输的技术。它在语义层面解决信息的含义表达与传输，把信息含义的理解环节部分或全部地前置到发送端，从而降低传输量，减少带宽需求。语义通信主要关注信源内容的语义表征、传输与重构，以及基于语义的无线传输。因此，语义通信关键环节主要包括语义编解码和信道编解码。

相对于传统的语法通信，语义通信具有三大特征优势。一是信息表征方式。语义通信将符号表征升级为语义表征，这样信源内容语义特征的提取和理解就从接收端前置到发送端，直接面向场景、用户意图和任务，因此增加业务功能，可提供增值服务，如情绪识别、情感分类、语音增强等等。同时，在特定条件下可增强数据安全，因为在没有语义解码模型情况下无法恢复原始信息。二是服务质量评价准则。语法通信通常以误符号率、误包率、丢包率等指标衡量服务质量，不能及时直接反映 QoE 等主观体现质量，语义通信采用语义准确性和感知质量来定义服务质量。三是传输带宽。语义通信仅仅传输语义信息，传输带宽需求可下降 10 倍，带宽需求下降将进一步带来传输时延和抖动的下降，提升传输可靠性和传输容量，并进一步与无线传输方案融合，提升无线传输效率。

4.6.2 关键技术

当前语义通信主要关注如下几个领域。一是语义信息度量。主要解决语义信息非统计特性和模糊性问题，以及语义熵、语义率失真函数、语义信道容量和语义通信系统性能度量问题。目前考虑用逻辑概率代替统计概率、引入模糊集合论和广义信息论解决。第二个问题要针对具体的信源内容具体分析，目前存在语义相似度定义，以及直接引入机器学习中的指标如精确率（如 BLUE）和召回率（如 ROUGE）等。二是语义特征提取。主要研究视频、图像、语音和文本等多模态信源语义信息提取、编码和压缩。很大部分工作是从机器学习领域直接转移过来。三是语义信源信道联合传输。主要研究语义编解码模块与信道编解码模块的联合设计，以及基于 AI 的联合训练问题，目标是最小化特征冗余和最大化重建质量。四是语义通信与 AI 融合理论。主要研究面向智能化需求的语义信息定义与表征、语义信息生成机理、语义编解码机制等。五是语义通信系统设计。主要研究支持语义信息处理与语义信号处理的网络架构，例如引入知识共享机制和语义处理面功能。

多模态信源语义表征、特征提取和编码的基本原理是：1) 图像语义通信。传统图像编码以像素为表征单元，以像素精准度为重建目标，在带宽受限下性能不佳。图像语义通信基于场景图方法，将图像语义用“主谓宾”三元组方式表征并传输。2) 视频语义通信。以人脸场景为例，其基本原理是在发送端通过识别人脸，提取人脸语义特征，然后编码传输，在接收端根据语义特征信息重建人脸。3) 文本语义通信。基本原理是通过数据集联合训练语义编解码器和信道编解码器，使其具有抗语义噪声和信道噪声的能力，通过语义噪声建模丰富数据集，进一步提升系统抗语义噪声能力。4) 语音语义通信。基本原理是发送端对初始音频进行文本识别和语音特征提取，然后编码传输到接收端进行语音合成。所提语音特征提取方案可实现比传统方法更好的语音识别和语音合成效果。

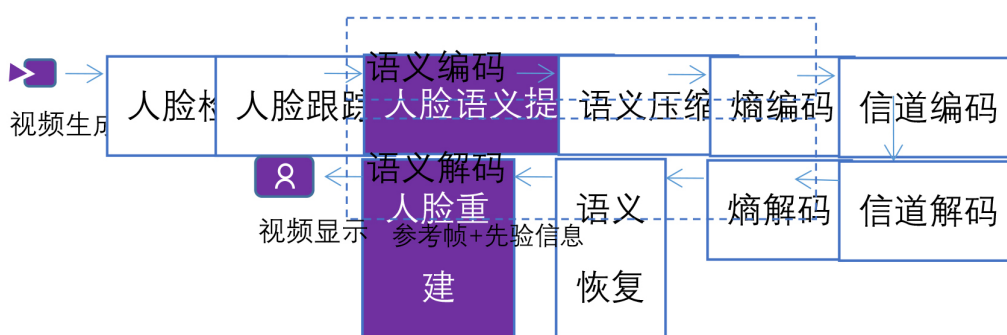


图 3 视频语义通信原理图

4.6.3 技术挑战

语义通信技术总体来说还不成熟，面临着四方面产业化挑战。一是多用户语义通信。语义通信实用化需要解决多用户通信问题，困难在于多用户可能对语义的理解不一致，造成多方通信失败。二是多模态通信，目前的多媒体业务基本都是视频、语音、图像、图片和文本的内容混合，而当前语义通信原型都是针对单一媒体

形态，无法实用。在产业化进程中，必须解决单个模型提取多模态信源语义信息难题，或解决多个模型如何保持语义一致性和传输同步性问题。三是知识库的构建与更新。语义通信依赖于收发双方一致的知识背景，需要系统支持知识库的分发、共享与更新，这点产业化难度较大。四是信息隐私保护问题。语义通信提取了用户的特征信息，例如面部特征、声纹特征，以及用户数据中的特征，同时，针对用户特征训练的模型可以用来模仿用户本人，带来极大风险，必须有足够强大的安全机制保障。

5. ICDT 融合的技术趋势

5.1 跨界融合技术趋势

信息通信技术跨领域、跨学科融合已成为新常态，如下十大跨界创新方向。可能影响未来 ICDT 技术发展。一是新感知。感知技术是数字化的数据底座，呈现出多技术融合、异质异构集成、微能源化发展趋势，包括通信感知一体化技术、无源传感技术、智能微系统、智能感知和数字孪生人系统等。二是新终端。未来新终端将具备生物友好和低功耗等特征。包括的技术有柔性终端、全息终端、模块化终端等。三是新算力。计算体系呈现多样化、多路线共存演进趋势，非经典计算逐步从理论走向实践。包括量子计算、光计算、存算一体等技术。四是新安全。传统补丁式、外挂式的安全防御体系亟待升级，实现从“网络安全”到“安全网络”的变革。包括量子安全通信、可信内生安全体系、基于生物和设备特征的统一身份认证等。五是新低碳。信息处理需求的增长为“双碳”目标的实现带来巨大压力，需寻求节能降碳新突破。包括“零瓦特 @ 零比特”技术、绿色新能源技术，以及通信网与能源网融合技术。六是新材料。更高频段、更低能耗的信息通信网络发展对新材料提出变革性需求。重点材料技术包括纳米打印新天线材料、碳纳米管新芯片材料和空芯反谐振光纤新材料等。七是新仿生。脑科学和材料学的发展，为信息通信领域的仿生技术带来新方向和新突破。包括类脑计算和 DNA 存储等。八是新组网。现有网络的组织关系总体来说是刚性的、封闭的，难以适应未来面向千行百业复杂场景、高度定制等发展需要。未来通信网络将向开放、柔性、积木式、多模态方向发展。包括即插即用功能、积木式服务化网络功能和按需服务功能，以及多模态网络技术，实现“应用网络与网络资源分离”新范式升级。九是新设施。信息基础设施与关联基础设施协同建设、融合发展已成新趋势。重点包括通信与市政公用基础设施融合、通信与楼宇基础设施的融合等。十是新范式。未来移动通信将涉及更多跨界领域和交叉学科，新的产业和商业模式不断涌现。包括产业研发新范式、生态发展新范式和信息服务新范式等。

5.2 量子计算及应用

量子计算是一种遵循量子力学规律的新型计算模式，在量子模拟和计算加速方面呈现出相对经典计算的“优越性”，已在化学、药物、材料、金融、物流和航空领域得到试验性应用。目前量子计算技术路线众多，各

有优劣，百家争鸣，各有侧重，产业发展存在很大不确定性。实用性通用量子计算机预计在 10~20 年内成熟，但针对特定应用的专用量子计算机可能近几年就能商用，将对信息通信发展带来深刻影响。

目前量子计算已有一些可能应用方向。一是面向移动网络的计算服务。量子计算为网络优化与业务优化提供指数级加速，推进网络高品质升级。为机器学习模型训练与计算提供指数级加速，赋能网络大脑，驱动网络智能化升级。二是面向垂直应用的算力网络服务。基于自有量子计算机算力、经典云计算基础设施和第三方量子计算机资源，通过确定性高可靠的算力网络为化学、医药、气象等存在超算需求以及航空、交通、物流、金融等存在优化算力需求的垂直行业提供量子模拟、量子计算和量子算法等新服务。三是量子信息网络将催生巨大服务新空间。基于量子隐形传态，量子信息网络可实现量子数据共享和小规模量子计算机互联，通过盲量子计算和分布式量子计算方式，未来为中小企业、高校和个人提供低门槛、低成本量子计算与存储服务。随着量子传感器技术与产业发展，量子信息网络将进一步扩大量子信息处理与量子计算范畴，带来更多综合性量子信息服务。

6. 结束语

移动通信技术与计算技术、感知技术、大数据与 AI 技术、控制技术的融合发展，正在形成 6G 技术新生态，在网络、空口、终端、应用各个层面带来诸多革新方案。为了 6G 可持续发展，本文倡议：

坚持全球 6G 创新体系和 6G 国际化路线。在单点核心技术攻关同时，需要结合未来可能的商业应用场景、网络部署方式等，加强 6G 系统设计研究，以终为始引导技术创新、标准制定和产业发展。加强基础技术和跨界融合技术的研究与实验验证，以及“安全、低碳”等新兴技术的研究和布局，在 6G 关键方向上积累技术和产业先发优势，并为人工智能、生命科学、环保能源、新材料等前沿领域的跨界融合创新拓展新的机会。信息安全、网络安全、产业安全和绿色低碳成为社会发展强约束要求。6G 系统设计要以柔性至简、绿色安全作为重要前提条件通盘考虑，超越单点最优，追求综合最优。注重与 5G 的技术协同、网络协同和应用协同，营造共同生态。

致 谢

- 责任编辑： 易芝玲，潘成康
- 中国移动： 潘成康，王启星，刘建军，邓娟，王莹莹，金婧，李娜，楼梦婷，苏鑫，陈天骄，侯帅，孙志雯，李昕莹
- 清华大学： 秦志金，段一平，杜其原
- 中国联通： 黄蓉，刘珊，庞博
- 北京邮电大学： 崔琪楣，张雪菲，陶小峰
- 上海大学： 孙彦赞，陈小静，张舜卿，徐树公

