

6G总体白皮书



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

摘要

多重因素驱动 6G 发展。一是解决 5G 网络投资高、功耗高、运维难等挑战的需求。二是“元宇宙”等未来新应用和新场景带来信息处理新需求。三是移动通信技术、计算机技术、人工智能与大数据技术融合（ICDT）发展带来的创新机遇。

ICDT 融合的 6G 将是一个端到端的信息处理与服务系统，是通信网络、感知网络和算力网络融合的智能网络。本文尝试提出信息处理效率概念作为 6G 直观的能力度量，围绕通信能力、计算能力、感知能力、AI 能力和安全能力定义了 6G 能力矩阵及性能指标等级，并探讨信息处理效率理论框架和最大化信息处理效率的技术途径。

ICDT 融合的 6G 网络是感知、通信、计算、智能一体化架构，资源共享、能力开放，应用协同。本文通过定义网络大脑、感知控制、计算控制、通信控制、用户控制与业务控制等关键功能实体，构建了一体化网络控制框架，并分析了分布式计算、分布式感知、分布式智能、内生安全和意图管理等关键技术。

ICDT 融合的 6G 空口是通信感知一体化空口、基于 AI 的空口，具备学习能力、通信能力、感知能力和多频段融合组网能力。其中，基于无线感知的无线通信，以及基于无线通信的无线感知是两个重点技术方向，具有高频谱效率、高硬件效率和高信息处理效率三大优势。

ICDT 融合的 6G 终端是功能升级的智能体，一是从智能个人终端向更友好的终端体验发展，二是从刚性形态向柔性形态发展，三是从个人终端向无人机、无人车、机器人及其他智能化设备的垂直应用终端发展，四是从封闭架构向开放模块化终端发展，为 6G 的丰富应用提供了重要支撑。

ICDT 融合的 6G 技术必然带来 ICDT 融合产业形态，形成以集成电路、基础软硬件为上游，以信息处理基础设施、能力平台和终端为中游，升级的 2C、2B 和 2G 应用为下游的产业新格局。为了 6G 更好的发展，本文建议加快 6G 创新链与产业链融合发展，培养 6G 高端人才体系，形成创新与产业集群效应，解决 6G 发展面临的理论、器件和芯片等瓶颈问题。

Executive Summary

Multi-fold factors drive 6G development. The first is to solve the challenges of high investment, high power consumption and difficult operation and maintenance (O&M) of 5G network. The second one is that the new applications and new scenarios such as "metaverse" bring new requirements for information processing. The third one is the innovation opportunities brought by the integration development of mobile communication technology, computer technology, artificial intelligence and big data technology (ICDT).

ICDT integrated 6G will be an end-to-end information processing and service system, and an intelligent network integrating communication network, sensing network and computing network. This paper attempts to put forward the concept of information processing efficiency as a 6G intuitive capability measure, defines the 6G capability matrix and key performance index priority in terms of communication capability, computing capability, sensing capability, AI capability and security capability, and discusses the theoretical framework of information processing efficiency and the technical way to maximize information processing efficiency.

The ICDT integrated 6G network is an integrated architecture of sensing, communication, computing and intelligence, with resource sharing, capability exposure and service collaboration. By defining the key functional entities such as network brain, sensing control function, computing control function, communication control function, user control function and service control function, this paper constructs an integrated network control framework, and analyzes the key technologies such as distributed computing, distributed sensing, distributed intelligence, native security and intention-driven O&M.

The ICDT integrated 6G air interface is an integrated one of sensing and communication, and an AI-based one, with learning ability, communication ability, sensing ability and multi-band networking ability. Especially, wireless communication based on wireless sensing and wireless sensing based on wireless communication are two key technical directions, which have three advantages: high spectrum efficiency, high hardware efficiency and high information processing efficiency.

The ICDT integrated 6G terminals are the autonomous things with upgraded



capabilities. First, it develops from an intelligent personal terminal to a more friendly terminal with excellent experience. Second, it develops from a rigid form to a flexible form for convenient use. Third, it develops from personal terminals to vertical terminals, such as UAVs, unmanned vehicles, robots and other intelligent devices. Fourth, it develops from a closed architecture to an open modular terminal. These new kinds of terminals provide important support for the rich application of 6G.

The ICDT integrated 6G technology inevitably bring an new ICDT integrated industrial form, forming a new industrial pattern with integrated circuits and basic software and hardware as the upstream, information processing infrastructure, capability platform and terminals as the midstream, and upgraded 2C, 2B and 2G applications as the downstream. For the better development of 6G, this paper proposes to accelerate the integrated development of 6G innovation chain and industrial chain, cultivate 6G high-end talent system, form the effect of innovation and industrial cluster, and solve the bottleneck problems such as theory, devices and chips faced by 6G development.



目 录

摘 要1

Executive Summary	2
1. 引言	1
2. ICDT 融合的 6G 能力	2
2.1 6G 驱动力与用例.....	2
2.1.1 6G 驱动力.....	2
2.1.2 无人化业务：智能体交互.....	2
2.1.3 数字孪生业务：虚实交互.....	4
2.1.4 沉浸式业务：多模态人机交互.....	5
2.1.5 网络自治业务：意图交互.....	5
2.2 6G 信息处理需求与趋势.....	7
2.3 6G 能力度量准则.....	8
2.4 6G 能力矩阵.....	9
2.4.1 通信能力.....	9
2.4.2 计算能力.....	10
2.4.3 感知能力.....	10
2.4.4 AI 能力.....	11
2.4.5 安全能力.....	12
3. ICDT 融合的网络架构	13
3.1 感知-通信-计算融合网络架构.....	13
3.2 关键技术.....	15
3.2.1 分布式计算.....	15
3.2.2 分布式感知.....	16
3.2.3 分布式智能.....	16
3.2.4 6G 内生安全.....	18
3.2.5 意图敏捷管理.....	20
4. ICDT 融合的 6G 空口	21
4.1 通信感知一体化空口.....	21
4.2 AI 空口.....	24
4.3 关键技术.....	26
4.3.1 学习型收发机.....	26
4.3.2 基于无线感知的无线通信.....	30
4.3.3 基于无线通信的无线感知.....	32



4.3.4 多频段融合组网.....	32
5. ICDT 融合的 6G 终端.....	34
5.1 友好终端.....	34
5.2 无人化终端（智能体）.....	35
5.3 柔性终端.....	35
5.4 模块化终端.....	36
6. ICDT 融合的 6G 产业.....	37
6.1 6G 产业趋势与格局.....	37
6.2 6G 产业发展建议.....	39
7. 结束语.....	42
致 谢.....	42
参考文献.....	42
缩略语.....	43

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、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。白皮书详细阐述了 ICDT 融合的网络架构与协议栈、感知通信计算一体化、空天地一体化、内生智能架构、意图网络、确定性网络、孪生体域网、内生安全架构、开放网络架构、AI 使能空口、多功能空口等技术,以及太赫兹、可见光、超大规模天线、智能超表面、全息无线电、新波形新编码等新空口使能技术。白皮书同时还介绍了智能泛终端、量子信息、生物信息和材料能源应用等跨界融合技术。

一年来,全球 6G 技术呈加速发展趋势。2021 年 1 月,欧盟正式启动 6G 旗舰研究项目“Hexa-X”,2 月份,美国贝尔实验室发布了《6G 通信白皮书》,3 月,日本宣布投入 500 亿日元进行 6G 技术研发,4 月发布 Beyond 5G 促进战略-6G 路线图。4 月,德国启动首个有关 6G 技术的研究项目,并在 7 月公布 6G 资金。NGMN 发布第一版《NGMN 6G 驱动力与愿景》白皮书。随后启动了 6G 用例研究与规范工作。5 月,欧盟 Horizon2020 项目“REINDEER”启动 6G 新天线技术研究,美国科学基金会面向 NextG 网络发起 RINGS 计划,6 月,韩国宣布,在 2025 年之前投资 2200 亿韩元开发和标准化 6G 核心技术,俄国无线电科学研究所向俄联邦通信部提交了一份 6G 研发路线草案,中国 IMT-2030(6G)推进组发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书,9 月发布了《6G 网络架构愿景与关键技术展望》白皮书和《通信感知一体化技术报告》、《超大规模天线技术研究报告》等报告;6 月,中国移动成立未来研究院,将致力于 6G 基础研究。8 月,英国布里斯托大学和伦敦国王学院成立了 6G Futures 中心。9 月,华为发布《智能世界 2030》报告。全球 6G 的发展呈现出跨界融合、多面突破的局面。

本白皮书是《ICDT 融合的 6G 网络》的第二版本,在 1.0 版本基础上,将聚焦感知、通信、计算融合的网络能力、架构、空口、终端和产业,介绍 6G 新进展,分析 6G 新问题,提出 6G 新方案。

2. ICDT 融合的 6G 能力

2.1 6G 驱动力与用例

2.1.1 6G 驱动力

多重因素驱动 6G 发展。一是未来新应用和新场景带来的新需求。5G 商业化激发人们对下一代移动网络的想象和期待。基于生产力和生产关系变革的新业务、新应用和用例不断涌现，对网络数据速率、时延、可靠性、定位精度等性能需求可能超越 5G 极限。二是信息、通信和大数据技术（ICDT）的深度融合，驱动 6G 功能多维扩展，推动网络服务能力和运行效率全面提升。计算和存储等资源将从中心扩展到边缘，网络也将具备内生计算能力和资源感知与控制能力。边缘 AI 和分布式 AI 加速发展，促使网络设计考虑 AI 部署、支持 AI 应用。数据已成为生活和生产要素，网络设计需考虑数据安全与合规、数据分析与应用、数据安全流通等技术的应用。三是 5G 网络面临的问题和挑战。在设计 6G 移动网络架构时，应继承 5G 移动网络的成熟技术和理念，深刻吸纳 5G 网络在系统设计、商业部署和运营经验等方面的教训。5G 投资高、功耗高、运维难等挑战需在 6G 中得到有效解决。

6G 智能化业务、沉浸式业务和数字孪生业务等新业务的不断发展，催生“元宇宙”等典型新业态，对网络及终端提出了更高的信息处理需求，驱动通信网络向感知网络、算力网络 and 智能网络升级，移动终端向智能体升级。

2.1.2 无人化业务：智能体交互

智能体是指具有环境感知、交互与响应能力的实体，如机器人、无人车、无人机以及其他智能移动设备等。智能体信息交互已成为 6G 新业务，尤其是无人化业务的关键支撑技术。

智能体信息交互是智能体与系统或其他智能体交换数据与信息的行为。在无人驾驶、无人制造等关键任务型场景中，网络和智能体必须支持更低的交互时延、更大的交互带宽和更高的交互可靠性。目前有两个明确的途径来提升信息交互性能，一是将信息采集（感知）和信息传递（通信）流程融合处理，减少不必要的

感知与通信行为，以降低交互带宽和处理时延。二是进一步增强无线通信能力和无线感知能力。对于后者，一方面，6G空口向毫米波、太赫兹和可见光等更高频段发展，增强无线通信能力，与无线感知频段将产生越来越多的重叠。另一方面，无线通信与无线感知在系统设计、信号处理与数据处理等方面呈现越来越多的相似性。这种技术趋势催生了通信感知一体化技术，为智能体信息交互带来了革新思路。

从上述分析可知，智能体信息交互分为智能体与系统之间，以及智能体之间两类。智能体与系统信息交互通过网络实现，智能体之间信息交互可以通过网络交互，也可以直接交互。如果把基站也当成一种智能体，那么智能体信息交互就可统一建模成智能体之间的信息交换。

智能体信息交互内容分为四个类型层次[4]：数据交互、模型交互、推理交互和决策交互。数据交互是指智能体与系统或其他智能体交换感知数据，包括原始数据或训练集数据，又称为协同感知。数据交互通过数据融合可以提高感知维度、深度和精度。模型交互是指智能体与系统或其他智能体交换训练模型或分担模型训练任务，又称为协同训练。推理交互是指智能体与系统或其他智能体分担推理任务或交换推理结果，又称为协同推理。决策交互是指智能体与系统或其他智能体达成一致行动约定的过程，又称协同决策。决策结果通知到智能体执行单元，推动任务执行或响应任务外的突发事件。

无人化业务具有三个显著特征：一是由具备不同程度的感知、通信、计算、学习和执行能力的智能体作为业务载体；二是具有明确的任务目标和生命周期；三是需要感知、通信、计算耦合的端到端信息处理。

根据用户的指令或意图（任务目标和生命周期要求），无人化业务由业务管理实体进行任务建模和子任务分解，并分配给所有参与智能体。管理实体还可以根据用户意图修改或删除正在执行的子任务。子任务是指一系列具有时空耦合关系的操作动作。所有的可操作动作构成操作空间，由若干信息处理流程执行。子任务的信息流程分解为感知、通信和计算，如图1所示。感知是对业务所有要素属性与状态的信息采集，计算包括所有业务相关的数据分析、模型训练、推理和决策。通信用来交互感知内容、计算内容和系统信息。每个智能体都将对阶段性

局域的业务状态，进行计算，确定操作动作。无人化业务生命周期将从初始状态感知开始，通过多个信息处理环的迭代，直到达到目标状态。

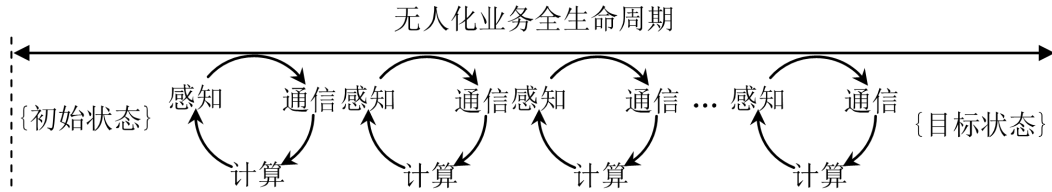


图1 无人化业务全生命周期信息处理流程示意图

2.1.3 数字孪生业务：虚实交互

数字孪生是物理系统的虚拟表达，是系统生命周期内数据、模型与分析工具的集成，用来镜像、理解、预测和调控物理系统的状态。根据文献【】定义的通用参考框架，数字孪生系统由用户域、数字孪生体、测控实体、物理域和跨域功能体。数字孪生的工作基础是虚拟系统与物理系统之间的信息交互，包括从物理系统中采集的数据以及来自虚拟系统的控制消息等，通过严格的同步使虚拟系统与物理系统趋于一致，并优化物理系统。为此，数字孪生还具有模型学习能力促进自身演进升级。

一个新的应用场景是人的数字孪生，数字孪生人是真实物理世界中的人在虚拟世界中的完整映射，包括外形、动作、器官、语言、思维、情感等。数字孪生人的未来业务场景分为三个不同层级：第一层级为体征孪生，实现人体体征全方位远程监测和精准预测；第二层级为通感孪生，实现人体情感和五官感受的传递；第三层级为控制移植，实现意念控制、思维移植、脑机通信，甚至脑脑交互。通过预测人的个性化行为习惯、生理特点和思维方式，可以实现更好的交互体验。

数字孪生系统是典型的感知、通信、计算融合系统。首先需要感知技术去读取物理系统某个维度某个层次的属性与状态信息，然后低时延高可靠地传输到虚拟系统进行计算（建模、分析与预测），然后形成决策命令，再次低时延高可靠地传达到物理系统，驱动物理系统（包括人体）改变状态以优化其性能或完成任务目标。

6G 网络不仅仅支持虚拟系统与物理系统之间的信息交互，也支持虚拟系统元素（组件）之间的信息交互，以及多个虚拟系统之间的信息交互，实现数字孪

生聚合体。

2.1.4 沉浸式业务：多模态人机交互

沉浸式业务是以增强的 AR/VR/XR（视觉）、全息（视觉）、通感互联（多感官）等形式提供感官体验的业务。多模态人机交互是沉浸式业务的关键，它包括人通过语言、动作、表情、脑电波等自然形态的图意表达，以及视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉等逼真的多感官感受。

感知通信计算一体化的 6G 能力，支持 XR 云渲染和三维重建。三维重建技术为用户打造超逼真的数字模型，通过云渲染和低时延交互让用户沉浸在三维虚拟环境中。

构成超现实用户体验的图像内容、区块链网络、人工智能技术都离不开算力的支撑。算力支撑着虚拟内容的创作与体验，更加真实的建模与渲染显示需要更强的算力作为前提。以算力为支撑的 AI 技术能够辅助用户创作，生成更加丰富真实的内容。依靠算力的 POW(工作量证明机制)是目前区块链使用最广泛的共识机制，保障虚拟资产权益和流转。

6G 强大的基础能力，将支撑虚拟世界中的数字形象、数字身份、数字资产、数字权益、数字情感和价值的确认、共识和尊重，逐步形成“元宇宙”生态。

2.1.5 网络自治业务：意图交互

意图驱动网络可以屏蔽服务供应商和操作系统的差异性，将网络从逐个节点的零散管理转变为自治网络管理，系统可以在意图对标的参数范围内进行自动操作、自发调整、自主修正。其中，意图是一种针对预期结果的声明性语言，即表明用户对网络的服务需求。意图交互旨在消除用户管理网络的鸿沟，为用户提供按需的差异化服务，是 6G 的重要体现，更是网络自治业务的基础。

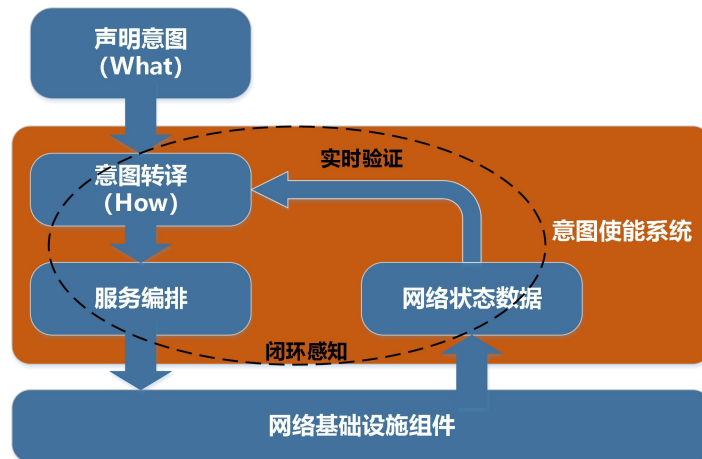


图 2 意图交互环路

意图交互是用户与网络输送数据与需求，以及网络自身感知运行状态的过程。意图交互的信息主要包括：输入意图、物理网元的拓扑结构、节点和链路的可用资源、网络节点的供应商和操作系统版本等。因此，意图交互的流向包含自顶向下的意图下发过程和自底向上的状态感知过程。意图交互环路如图 2 所示，声明意图与意图使能系统交互需求信息，意图使能系统完成意图转译、服务编排后与网络基础设施组件交互配置信息，网络基础设施组件与意图使能系统主动交互网络状态数据。通过用户、意图使能系统与网络基础组件之间的信息交互，能够实现网络自治业务的闭环感知与实时验证。



图 3 网络自治业务流程

网络自治业务面向 6G 网络更高的业务复杂性和运营成本压力，从全生命周期的角度使能敏捷高效运维，其工作流程如图 3 所示。首先，用户定义意图表达，此时意图是抽象的、宏观的。抽象意图通过转译可以形成逻辑策略，对于常态化的业务可以直接执行模板化转译，对于新型业务可以适应性的生成新的意图-策

略映射关系并存储变化形态。新的变化形态需要通过进一步的校证实证其有效性，常态化的转译结果需要结合网络状态进行预验证，能够满足意图并将在网元设备中执行的策略部署到基础设施。最终，系统将监控网络状态，对意图实施进行持续验证。网络自治业务有助于实现 6G 网络自动化和运维智能化，可以从根本上带来业务敏捷性，保障用户极致体验，降低 OPEX。

2.2 6G 信息处理需求与趋势

信息采集、信息传递、信息计算与信息应用是信息处理四大功能流程，相互独立解耦。这种烟囱式信息处理无法充分利用不同处理环的先验信息，导致不必要的感知、通信与计算行为，增加了信息处理时延。ICDT 融合的业务趋势驱动信息处理功能的耦合，相邻信息处理环发生交叠，支持信息处理流程融合成为 6G 信息处理与服务架构设计的重要功能需求，传统信息处理与服务架构面临变革，通感融合、算网融合和网业融合成为信息处理的趋势，如图 4 所示。

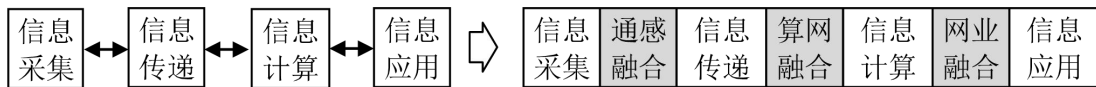


图 4. ICDT 融合的信息处理架构

通感融合：感知与通信交叠融合。一方面，无线感知与无线通信共享频谱共享硬件共享信息，可做联合信号处理与数据处理；另一方面对无人化业务、沉浸式业务和虚实孪生业务生命周期中的感知与通信处理环节，进行处理任务的调节与折衷，优化信息处理效率。

算网融合：通信与计算交叠融合，构建扁平、泛在的算力网络。网络和算力在协议、形态、大脑方面实现一体化。算力和网络在协议层面融合，突破传统以目的地寻址的路由方法，融合算力状态感知与调度的算网协同路由；算力和网络在形态层面融合，实现在网计算，算即是网，网即是算；算力和网络在大脑层面构建统一编排调度的中心。算力既是网络资源，也是功能，也是服务。

网业融合：业务管理实体设置在网络中的控制功能实体中，根据业务状态动态调度网络资源和重构网络功能，也可以根据网络 and 智能体状态动态调整业务需

求。

因此，传统的业务、用户、网络和终端四要素组成的信息服务架构，将演进成感知通信计算融合的信息服务架构，如图 5 所示。该架构中，业务、用户、网络和终端（智能体）的属性与状态相互开放共享。用户的属性与状态贯穿在网络、终端与应用平台中。

为了给用户提供更丰富的内容、更沉浸的体验、更自然的交互，无疑对网络和终端提出了更高的能力需求。

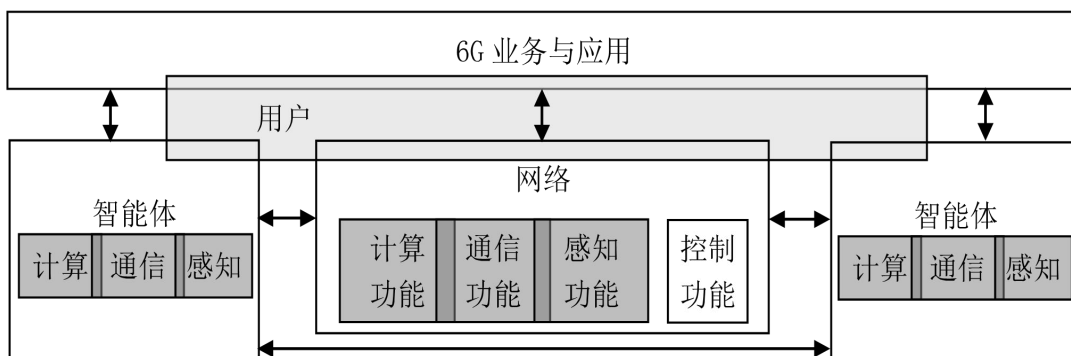


图5 ICDT网联智能体信息交互架构

2.3 6G 能力度量准则

6G 将是通信网络、感知网络、算力网络融合的智能网络，对其能力评估需要从业务与应用角度出发的综合能力度量准则。本文尝试提出信息处理效率概念作为 6G 直观的能力度量。构建信息处理效率理论框架，研究最大化信息处理效率的技术途径及其对 6G 系统设计的影响，是一个重要的理论课题。

首先，6G 是一个信息处理系统，信息处理效率简单定义为在给定信息处理资源条件下，最大的信息处理量。同时，6G 是一个信息服务系统，还要进一步定义 6G 服务和应用全生命周期内的有效信息处理量。有效信息处理量是推动服务与应用的初始状态向目标状态递进的必要信息。必要信息可由信息处理过程中的信息增量获得，可简单分解为信息感知量、信息传递量和信息计算量，每个处

理流程都生成信息增量。信息感知提供原始增量，信息计算获得最终有效增量，而信息传递实现原始增量和最终增量的空间复制。因此，确定（优化）6G 信息处理效率，可以转化分解为最小化业务信息增量。确定最小信息增量是为了避免冗余不必要的信息处理行为，从而最大化信息处理效率。

信息处理效率理论框架中，关键是信息处理任务的建模与分解，以及信息处理资源的建模与量化。信息处理任务包括感知子任务、通信子任务和计算子任务，信息处理资源包括感知资源、通信资源和算力资源。在多维资源可量化可调度假设下，信息处理任务可分解成不同的子任务方案，从而对不同维度资源具有不同的需求。因此，信息处理效率优化被最终建模为信息处理任务与信息处理资源的匹配问题。进一步，定义信息处理时延与信息处理可靠性等约束指标。信息处理时延包括感知时延、通信时延和计算时延，信息处理可靠性是考虑感知可靠性、通信可靠性和计算可靠性在内的信息增量的可信度。约束指标是业务质量与业务体验保障，是多维资源联合调度的约束条件。为了简化问题求解，采用两种次优求解方法，一种是针对网络资源的状态，求解优化的处理任务分解方案，另一种是针对信息处理任务指标，求解优化的资源调度方案。当然，最终的优化结果，是相互资源调度方案与处理任务分解方案的迭代优化。

2.4 6G 能力矩阵

6G 的多维功能与性能定义，形成 6G 能力矩阵。功能描述了 6G 可以做什么，性能表述了该功能做的如何。对于不同的功能，有不同的性能指标优先级考虑，下面的分析中，以 5 分作为最高级进行优先级评级，其他低于 3 分的性能指标不再在矩阵中列出。

2.4.1 通信能力

6G 通信功能具体分为地面通信与卫星通信两部分，具体性能指标维度与 4G、5G 基本一致，包括峰值与体验速率、时延、可靠性、容量（连接数）和覆盖等。当然，频谱效率、能量效率也值得关注。相对于 5G，相同的指标参数需要进一步量级提升，尤其是确定性，是 6G 能力的关键指标。星地一体化架构下，卫星

通信功能作为地面通信的补充，性能指标重点是体验速率与全球覆盖率。

功能/性能	体验速率	时延	可靠性	确定性	容量	覆盖
地面通信	5	5	4	5	5	4
卫星通信	5	4	4	3	4	5

表 1.1 6G 通信能力矩阵

3.4.2 计算能力

狭义计算能力是指单个计算中心、服务器或计算芯片的计算性能。6G 计算能力应考虑计算网络融合框架下的目标域综合计算性能。6G 算力呈现出内核多样化、分布泛在化、通过网络连接能力，发挥算力集群优势。6G 计算将支持通用计算、专用计算、高性能计算（矩阵计算）、类脑计算等计算架构，支持 AI 计算、隐私计算、可信计算、情感计算、数据计算等应用需求，支持云计算、边缘计算和终端计算多域多级分布式协同计算。

6G 计算能力大体分为计算和存储两部分，其中计算具体又分为通用计算、专用计算，以及云计算和边缘计算子功能。计算与存储首要性能指标是峰值运算速度（如每秒浮点运算数）和可靠性。时延、确定性和容量性能根据场景有所侧重。

功能\性能		峰值运算速度	可靠性	时延	确定性	容量
计算	通用计算	5	5	4	4	5
	专用计算	5	5	5	4	4
	云计算	5	5	4	4	5
	边缘计算	5	5	5	5	4
存储		5	5	5	4	5

表 1.2 6G 计算能力矩阵

3.4.3 感知能力

6G 感知能力由网络感知与终端感知综合体现。考虑到终端感知能力的受限性，这里仅分析网络感知能力矩阵。在功能维度，感知包括目标定位、目标检测、目标成像和目标识别四类。目标定位具体分为测距、测角和测速三个子功能，具

体应用中还可以分解水平定位、三位定位、绝对定位和相对定位等细分功能。目标成像通常用来支撑目标识别和目标分类等上层应用。在性能维度，与通信系统性能指标类似，重点指标有感知精度、可靠性、时延、确定性与容量等，其他能效、覆盖距离、可用性等指标也值得关注。感知精度是感知功能最为关键的指标，具体可以分解为测距/测速/测角精度、非模糊距离/速度、距离/速度/角度分辨率等。检测精度一般是指检测概率，包括虚检概率和漏检概率。成像精度一般用成像分辨率来表征。对于实时性要求高的信息处理任务，感知时延必要考虑，这通常考察的是感知设备中感知模块的响应时延与信号处理时延。

功能/性能	精度	可靠性	时延	确定性	容量
目标定位 (测距、测速、测角)	5	5	4	4	5
目标检测	5	5	4	4	5
目标成像	5	5	4	4	4

表 1.3 6G 感知能力矩阵

3.4.4 AI 能力

6G 将是人-机-物智慧互联、智能体高效互通、“感知-决策-执行”一体的架构级智能网络，通过与 AI 技术的多层级深度融合，实现网络自治、自调节以及自演进。

6G AI 能力体现在对内的智慧感知、智慧管理、智慧决策和智慧编排等，对外的抽取和封装网络能力，为 AI 应用提供底层能力保障。6G AI 的重要特征是分布式多级多域 AI，这让分散的低计算能力设备和智能体能够高效实时协作，形成网络增强 AI。终端 AI 可以感知分析用户行为，提升终端资源效率与节能；接入网 AI 感知分析终端与空口状态，提升空口传输效率与节能；核心网 AI 感知业务需求优化网络部署与管理，构建网络大脑。

6G AI 能力将从支撑情感交互、脑机交互、智能体与人交互拓展到支撑智能体交互互联，极大扩展 6G AI 应用。表 1.4 给出了 6G AI 能力矩阵

需求/能力	智慧感知	智慧决策	智慧管理	智慧编排
终端智慧	5	5	4	4
接入网智慧	4	5	5	4
核心网智慧	4	5	4	5

表 1.4 6G AI 能力矩阵

3.4.5 安全能力

ICDT 融合与空天地海一体化发展，对基础信任机制、智能协同、存证与溯源、应急处置等需求将更为强烈。传统分散式、外挂式、补丁式安全防御模式没有全面考虑系统安全威胁，已无法有效实现完整性、可用性、隐私保护等方面所期望的安全目标。借鉴人体生物学理念，向内思考，通信和安全一体化设计，构建自免疫的内生安全体系，成为 6G 安全变革趋势。6G 将充分利用 ICDT 深度融合优势，借助网络原生的感知、计算、AI、大数据、数字孪生能力，对攻击进行实时监测、分析、溯源、关联、演练、预防，实现从被动防御向主动防御转变。

从场景和需求层面，6G 内生安全需要满足三大类需求：业务的安全、安全的服务、安全的安全。业务的安全指内生安全需要能够保障 6G 网络各层自身安全，包含软硬件设备及资源、传输、运行、大数据、AI 等各能力组件安全、各行业场景安全等需求；安全的服务指内生安全面向应用层，内生安全能够提供安全能力、安全管理等安全服务，例如：旧业务下线时的安全收缩自适应、新业务上线时的安全能力自动化编排等需求；安全的安全指内生安全能够保障自身安全。通常，安全与系统暴露面存在同向关联关系，因此，6G 内生安全应遵从精简的原则，尽可能深度融于网络并尽量精简和优化设备，包括软件、硬件、端口等。

从能力层面看，6G 内生安全需要具备至少四个方面的能力：一体化、协同、智能、可度量。一体化指安全要从标准协议设计起即全面与网络相关功能同步考虑、融合设计、建设；协同指 6G 涉及的端、网、管理等各层级各层次安全能力之间要能够进行全网级、一体化协同；智能包括智能决策和智能自适应，智能决策指 6G 安全尤其是 6G 安全服务与安全运维管理要能够支持全面的智能化自动化决策与下发，如安全策略与安全能力的灵活智能编排、深层次身份如物理层或

生物身份等,智能自适应则指 6G 时代安全能力需要能够在构建后随着网络变化、外部攻击变化、内外部情报变化等进行全网自动化影响分析和能力适配、升级,这就要求 6G 安全相关功能模块具备记忆和自学习的能力;可度量则指 6G 安全需要能够支持安全能力的可规划、可算、可控,如同网络覆盖可进行网络规划优化、投入与效果可测量等。

功能性能	一体化	协同	智能	可度量
业务的安全	5	5	5	5
安全的服务	5	4	4	4
安全的安全	5	5	5	4

表 1.5 6G 安全能力矩阵

3. ICDT 融合的网络架构

3.1 感知-通信-计算融合网络架构

6G 网络架构将是感知通信计算一体化架构,具体包括三层:资源层、能力层和应用层,如图 6 所示。其中,资源、能力与服务三位一体,资源共享、能力开放、业务协同,资源即服务,能力即服务。

6G 资源层包括感知资源、通信资源、计算资源和数据集资源等。感知资源包括无线感知频谱资源和硬件资源,具体分为雷达、摄像头、专用传感器等,以及计算存储资源及相关软件资源。通信资源包括路由器、网关、基站等硬件资源以及无线频谱资源。计算资源包括各类异构通用或专用计算单元、存储器和服务器等。数据集资源是网内、网外所有用户、业务、网络和环境相关原始数据集、训练集和测试集等,包括个人大数据、医疗大数据、工业大数据、交通大数据和教育大数据等。资源层将通过微服务云化平台管理和调用资源形成不同原子化功能,为能力层提供服务。

6G 能力层包括感知能力、通信能力、计算能力与 AI 能力。感知能力是指网络与终端具备的对所有 6G 系统要素的属性与状态信息的获取能力。除了通过数

据接口方式获得多域状态外，6G 还将通过无线感知方式实现目标定位（测距测速测角）、跟踪、检测和成像功能，进一步提供基于位置服务、基于测距服务、基于成像服务和目标监测与识别服务等。通信能力包括接入、转发、寻址、路由和同步，将提供确定性传输服务、更低时延更高可靠传输服务以及 100G-1Tbps 的增强宽带服务。计算能力包括通用计算、专用计算、矩阵计算、异构计算、分布式计算等模式，提供 AI 计算、数据计算和通信计算。AI 能力主要是数据训练和推理，提供生物识别、自然语言处理、计算机视觉和机器人决策等服务。这些基础服务能力可进一步支持人机交互、智能体交互和虚实交互，实现更高层次的综合应用。

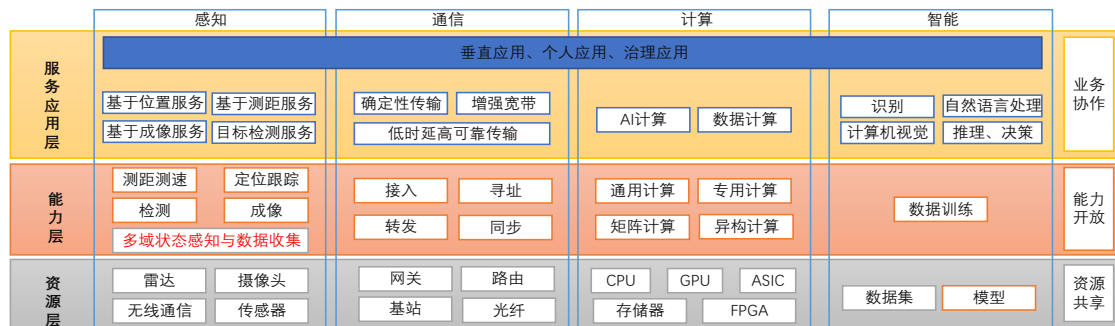


图 6. 6G 感知通信计算一体化网络架构

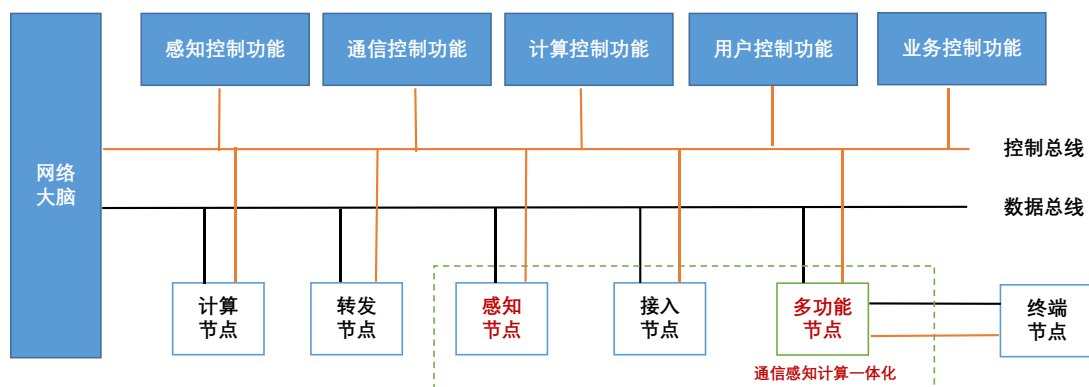


图 7. 6G 感知通信计算一体化智能控制架构

为了有效实现网络资源、能力与应用管理，需要定义 6G 网络关键的管理实

体及其拓扑架构，如图 7 所示。主要包括了网络大脑（网络智能与控制中心）、感知控制功能、通信控制功能、计算控制功能、用户控制功能、业务控制功能等功能实体，以及计算节点、通信节点（接入转发）、感知节点和终端节点等资源实体。三者通过控制总线与数据总线相互访问和交互。网络大脑基于全局感知，形成全局资源与能力管理策略，可以实现基于通信与算力状态的业务编排，也可以实现基于业务需求的通信与算力联合编排。特别地，感知控制功能感知整个系统的所有要素属性与状态，并实时分享到网络大脑即其他功能实体，重点是基于网络大脑的资源与功能管理策略，调度感知资源，形成感知能力，保障满足网络运行与业务运行需求。网络大脑支持“集中+分布”协同控制，实现智能化泛在的分层融合组网。在集中网络和边缘网络之间进行资源灵活调度，应用和控制层面集中和自治协同。通过分布式与集中式协作的云、边、端、业融合，一方面将更多的网络功能扩展到网络边缘，实现区域自治的边缘网络；另一方面将面向全局编排调度的功能集中，支持更加复杂的跨域业务。

在通信感知一体化网络架构中，定义两类新的节点：多功能网络节点和多功能终端节点。前者是传统网络中的接入节点、转发节点、计算节点和存储节点的部分功能或全功能融合节点，具有多级分布式特征。后者是具有本地通信、感知、计算和智能的移动终端，即智能体。

3.2 关键技术

3.2.1 分布式计算

算力网络是 6G 的基本属性之一，其基本思路是通过通信与计算等多维度资源的统一管理和协同调度，实现连接和算力的全网优化，包括集中式、分布式、及混合式等多种技术路线。其中分布式计算尤为重要，一是分布式感知、分布式 AI 和网络功能边缘化的算力需求驱动，二是分散的算力资源共享与效率提升需求驱动。

分布式计算基于网络分布式控制协议，实现算力信息的分发与基于算力寻址的路由，将计算任务分解并调度到合适的计算节点。因此，分布式计算的关键在

于计算任务的建模与分解,算力资源的建模与感知,以及计算任务的分配与同步。异构数据、异构计算资源和不同的 AI 模型与算法,都对分布式计算提出挑战。

3.2.2 分布式感知

随着 6G 新技术、新场景、新业务的不断涌现,在 ICDT 深度融合的趋势推动下,未来 6G 网络架构不断向智能化、服务化的方向演进,对网络高能效、灵活性、及时性的要求越来越强烈。以各自独立的传感器为基础的系统,难以有效地应对现实中日益复杂的各种差异化需求。当前通信网络待完善和难解决的感知问题,催生出 6G 网络的各种感知需求,分布式感知将会成为解决这些问题的关键技术。分布式系统是由一组通过网络进行通信、为了完成共同任务而协调工作的计算机节点所组成的系统,其目的是利用更多的机器,处理更多的数据。分布式感知是以分布式计算机为参考建立的一种多传感器的数据处理方式。

在分布式感知系统中,每个传感器都可独立地处理其自身信息,相互分享观测结果,之后将各决策结果送至数据中心进行融合。数据互联简单、可靠性强,对计算和通信资源要求也低。采用分布式感知技术,在提供大量数据的同时,还能避免电子对抗对单个传感器系统所造成的严重性能下降。

3.2.3 分布式智能

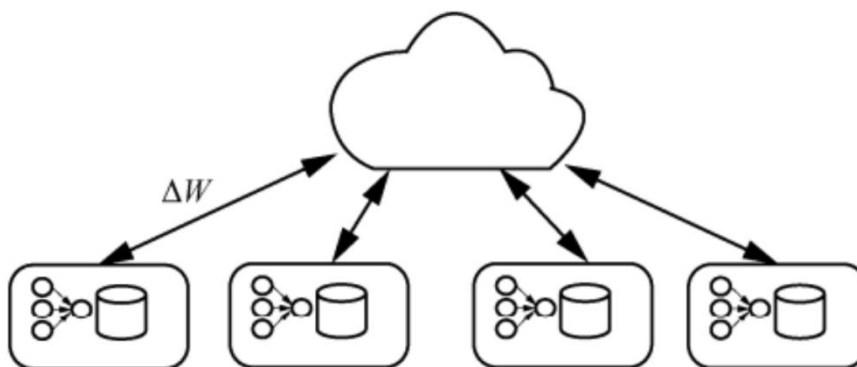
“智能”表示以 AI/ML 作为核心技术,用于网络自身的感知、分析、最优决策,分布式智能是 6G 智能内生网络架构的重要特征^[1]。之前的几十年中集中式系统一直是数据和数字内容共享的标准方法。由于系统变得更加复杂并且需要点对点共享而不是分层共享,单台计算机的存储和计算能力已经不能够满足现实的需求,因此迫切需要利用分布式智能系统架构。在这样的环境中,系统资源固有地分布在整个网络中,从而消除了集中式系统中存在的瓶颈。随着智能的加入,每个节点都成为一个完全智能体,能够与其他节点协调合作,以实现局部目标和全局目标。

分布式智能主要研究在逻辑上或者物理上分布的智能系统之间如何协调各自的智能行为,实现问题的并行求解。这类分布问题求解的研究目标是要建立一个由多个子系统构成的协作系统,各子系统之间协同工作对特定问题求解,在分

布式问题求解系统中，把待解决的问题分解成一些子任务，并为每个子任务设计一个问题求解的任务执行子系统。通过交互作用策略，把系统设计集成为一个统一的整体，并采用自顶向下的设计方法，保证问题处理系统能够满足顶部给定要求。

未来的 20 年，人工智能将成为科技的主流，在各个行业广泛部署，同时，移动设备将呈指数级增长，导致计算资源由云端向边缘端转移^[2]，分布式的计算资源使得基于中心云的集中 AI 平台向分布式的 AI 平台转变。这种分布式 AI 平台，可使每个参与协作的智能节点或设备之间传递的只是一部分参数或运行结果，而不是所有的原始数据。同时，分布式 AI 平台可以支撑模型在边缘设备之间的交换和协同，以及跨网络之间的联合推理^[3]。分布式 AI 突破了集中式智能的运行瓶颈，同时避免了数据传输的浪费和低效，可极大促进 AI 在全社会的普及。因此，大规模的分布式训练、群智式的推理协同，以及对数据的隐私保护促使 6G 网络需要对 AI 平台的原生支持和分布式部署，实现在任何位置都能运行 AI 应用，助力构建新的全行业智能通信生态系统。

目前一种潜在的分布式人工智能方法即分布式联合学习成为业内关注的热点。为了加速模型训练，业界提出了分布式学习。当前的研究热点联邦学习作为分布式的机器学习，通过使用移动端节点上的分散数据进行本地训练，以分散的方式训练出中心模型。仍然能够达到高质量的训练效果，并且减少了数据传输的成本，达到了保护数据隐私的目的。图 8 展示了联邦学习架构，节点使用本地数据集进行模型训练，然后发送更新的参数到服务器，服务器再将聚合后的参数更新返回给各节点^[4]。



(a) 联邦学习架构

图 8. 分布式的联邦学习架构

在未来分布式联合学习将是实现 6G 网络多用户智能分布协作的关键技术。在 6G 时代，如何设计分布式学习架构、优化参数通信方式，将成为影响 6G 网络 AI 应用产出效率的重要因素。

3.2.4 6G 内生安全

为 6G 构造内生的安全免疫能力体系，设计构建 6G 统一的共识可信身份与信任评估体系是第一步。构建深层次的具备不可抵赖、不可伪造、不可篡改的共识可信身份是关键也是基础，人和设备需要具备同等身份，并进行实时动态的关联管理。基于可信身份，抽取行为等多因子，进一步建立身份信任评估体系。6G 共识身份与信任体系进行集中式与分布式相结合的混合方式部署，以更好的支撑空天地海的泛在接入和业务运行，以及高效的安全处理，如取证溯源等。

进而，基于 6G 共识可信身份与信任评估体系，在全网层级、网元、边界各层级设计，为 6G 构建一体化、协同、智能、可算的安全免疫能力体系。在全网层级，具备 6G 全网安全视角的全网级安全管理系统是构建 6G 全网安全逻辑平面的核心，机器学习等技术将为全网安全管理的海量安全数据分析、智能决策、智能编排、智能记忆和自适应提供必要的赋能；在网元侧，空天地海相关的 6G 各网元自身均需具备一定的安全感知识别、安全防御、智能安全分析和记忆学习、智能安全协作等能力，以提高 6G 安全的安全威胁及时发现能力和本地化处置效率；通常，边界是提前发现威胁、控制安全风险、尽可能降低安全损失的最好位置，因此，在 6G 网络边界侧安全应优先以严格的安全策略为原则，在统一的接

入认证框架下，基于共识可信身份和信任评估体系，分业务、分场景设计安全准入机制、实施持续信任评估，适度平衡安全和效率。

通信和安全一体化设计有助于实现 6G 内生可信愿景。通信安全一体化是指，通过通信和安全的联合设计，尝试在理论上保证联合设计的系统满足安全需求，以解决 2G-5G 外挂式安全机制不具备原生可信安全属性的瓶颈。其中关键问题在于，建立用于证明或者验证系统能够在给定攻击情况下满足安全需求的理论模型；例如，证明系统的失陷概率小于某个给定值，或者系统满足安全属性。

目前，在一些具体通信场景下，已有一些安全模型可以使用，但是系统级安全模型仍有待学术研究。在通信感知一体化场景下，以机密性和完整性安全需求为例，雷达信号的隐蔽性和抗干扰性可由截获概率、旁瓣水平、中断概率衡量，通信信息的机密性由香农保密容量衡量，可合理设计通感信号波形使得系统的隐蔽性和抗干扰性满足给定安全需求，同时最大化保密容量，达到通信-感知-安全联合设计的效果。在通信认证场景下，密码学身份认证机制的安全性可采用 eCK 等安全模型证明或者形式化验证理论进行验证，在设计认证机制时，首先制定通信系统认证机制的安全威胁以及需要满足的安全需求，认证机制的设计目标是在满足安全需求的情况下，使得通信开销、计算时延最小。通信安全一体化可扩展到内生安全通信协议设计上，2G-5G 移动通信协议在设计时对安全性考虑不够完善，易遭受恶意攻击；通信安全一体化协议设计是在设计通信协议时同时考虑通信功能和安全隐患、安全需求，并保证协议在达到通信功能的同时，可形式化验证满足安全属性集合 $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ ，即协议同时满足通信目标和安全目标。

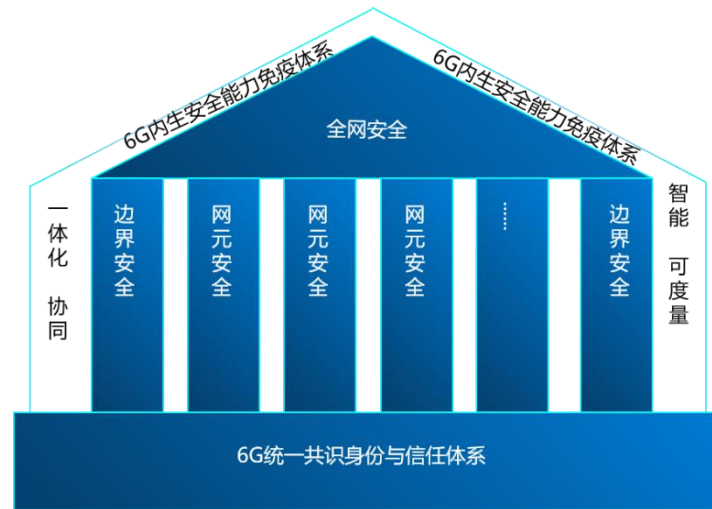


图 9. 6G 内生安全体系框架

3.2.5 意图敏捷管理

意图敏捷管理技术是网络和服务管理向自主范式演进的重要基石，融合意图引擎、服务编排与实施验证三大基本步骤，面向用户意图与网络意图实现“上联意图、下联感知”的网络敏捷管理，如图 10 所示。意图敏捷管理技术提供了自上而下的用户意图解析能力，自下而上的基础设施抽象能力。以用户为中心的意图敏捷管理技术提供了一种抽象的方法，在服务水平协议和最小网络能力暴露的协同作用下，影响网络基础设施和服务的设计、供应、部署和保证。意图敏捷管理的过程中，以用户可理解的形式提供输入指导，用户通过声明式的意图与网络交互所需服务的描述，而不必详细说明配置级信息。意图驱动网络能够理解用户/网络意图，并通过意图-服务优化供应、服务-资源统一编排、策略-配置实时优化，提取不同网络节点所需的信息，最终提供相关网络功能的配置，实现 6G 网络的敏捷管理。

意图本身是一个没有意义的实体，当意图与服务供应或交付目标关联时，就成为网络管理框架的关键。意图引擎构建意图模型将上下文信息从用户/网络意图映射到所需的服务，意图内涵与服务提供商商定的服务等级协议 (Service-Level Agreement, SLA) 相匹配，为用户提供必要的适当资源和网络功能。服务编排利用一组网络协调器抽象资源状态，并以网络切片、虚拟网络功能图或服务功能链的形式为不同的用户/网络意图部署具体的配置。由于网络状态动态变化，实

时验证能够基于机器学习、数字孪生等理论，通过闭环反馈机制驱动策略动态更新，保障用户/网络意图必需的动态服务生命周期，实现故障实时发现，网络自主优化。

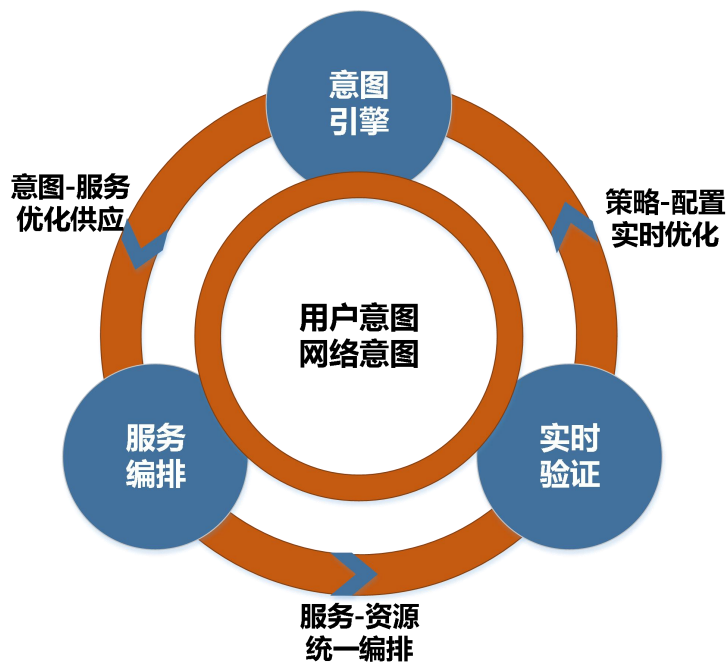


图 10. 意图敏捷管理

4. ICDT 融合的 6G 空口

4.1 通信感知一体化空口

通信感知一体化技术总体框架如图 11 所示，分为三层：资源层、能力层和应用层。资源层包括通信感知一体化频谱、通信和感知软硬件资源以及计算资源等。能力层包括数据处理功能、通信功能、感知功能，以及协同功能。具体地，通信功能包括接入和转发，感知功能包括目标定位（测距测速测角）、目标跟踪、目标检测和目标成像等。应用层是基于能力层的功能，提供的确定性传输、低时延高可靠传输、大带宽传输等通信服务，位置服务、测距服务和成像服务等感知服务，以及这些服务通过智能体信息交互方式在无人化业务中的应用。

无线感知通信一体化的设计思路是尝试在同一频谱同一设备上实现感知与通信功能。因此，在具体的通信感知一体化系统设计中，可采用正交频谱资源复

用方式（最小化干扰），共用收发天线（可能需要额外配置感知信号接收天线）和射频电路，并在基带部分做联合信号处理（主要是为了干扰消除）。当通信数据与感知数据对应的业务流有相关性时，可进一步做联合数据处理。在无人化业务流程中，根据信息处理流程的耦合需求，在共频谱、共设备基础上，灵活选择联合信号处理和联合数据处理。

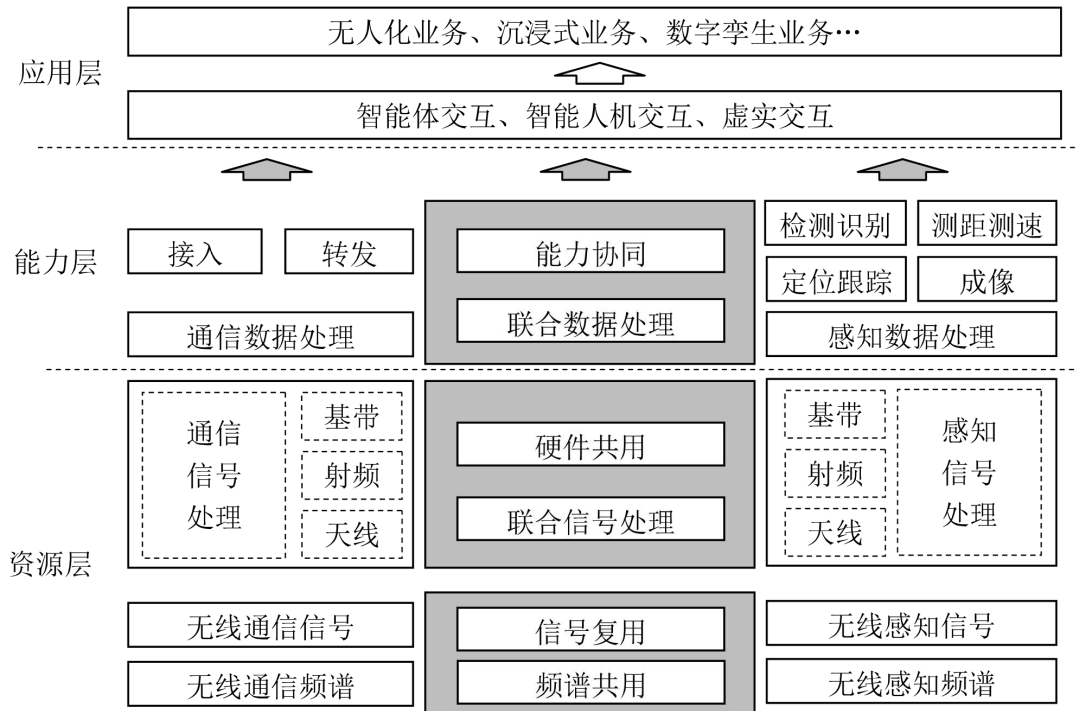


图 11. 通信感知一体化技术框架

将通信感知一体化技术应用到智能体信息交互中，部分或全部智能体都将配置一体化设备。这样，信息交互存在四种无线信号方式：无线通信、无线感知、基于无线感知的无线通信，以及基于无线通信的无线感知。其中前三种是重点方式，如图 12 所示。无线通信与无线感知是常规的手段，而基于无线感知的无线通信则是将无线感知采集目标信息的能力转化为通信手段。这点类似于基于光学成像（图像识别）的二维扫描技术、可见光成像通信技术[7]、无线射频标签（RFID）技术和反向散射技术[8]。但二维码是静态的，可见光成像通信虽然实现动态传输，但速率较低，且只能工作在可见光频段。RFID 和反向散射技术属于低速率近距离无源通信技术，通常用于物品标签和物流跟踪，不适用于动态环境下智能体交互。

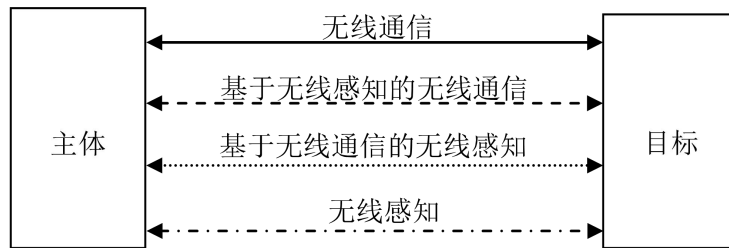


图 12. 基于无线信号的信息交互方式

无线感知和基于无线感知的无线通信采用相同的发射和接收处理流程，不同点在于：无线感知中感知主体仅针对目标状态进行感知，目标不参与感知过程，而基于无线感知的无线通信需要目标参与对待传信息进行编码，感知主体针对编码响应回波信号进行检测。两者的回波检测可以做联合检测。

基于无线感知的无线通信可以采用多种信息编码方式，例如类似“哑语”的手势编码，或智能超表面编码。智能超表面的出现为基于无线感知的无线通信提供了一种新手段[9]。其基本原理是信息交互的一方智能体配置可通过机械、电子、光学感应或其他方式调控的超表面单元（结构化的电磁材料基本单元，对电磁波具有特定的响应），使其排列结构按照待传信息编码发生变化。信息交互的另一方智能体发送特定调制的电磁波，并接收对方的回波。由于回波携带了与对方编码信息对应的电磁波特征，因此可以通过回波检测获取对方的编码信息。基于无线感知的无线通信系统包括感知信号收发机和回波调控器两部分，如图 13 所示。感知主体收发机中，感知信号生成器生成感知信号，可以是雷达体制的雷达信号，如 chirp（啁啾）信号，也可以是通信体制中基于伪随机序列调制的无线信号（如 OFDM 信号）。感知信号发送链路主要是射频链路和发送天线，可共用通信信号发送链路。发送天线可以是大规模数字阵列天线。回波信号接收链路主要是射频链路和接收天线，可共用通信信号接收链路。接收天线可以共用发送天线，也可以独立发送天线，但两者之间通过干扰隔离或/和干扰消除手段避免干扰。回波信号检测器利用本地感知信号对接收信号进行检测，并将检测结果送往目标信息译码器进行译码，可共用通信基带处理模块。译码算法与感知目标编码器采用的编码器的编码方案对应。译码信息数据可进一步与通信数据做联合处理后上报应用层。感知目标编码器中，信息编码器对相关信息序列进行信道编码，例如采用 GF（256）域的 RS 码或卷积码等。回波调控器根据编码输入对编码超表面中的

电磁单元进行调控，使得入射波的回波具有与编码信息对应的电磁特征。

感知主体与感知目标通过预定方式约定通信参数，分为两个阶段，第一个阶段基于预定参数进行基于无线感知方式的通信，获取后续的通信参数，包括信道状态估计序列生成参数和长度、信道状态估计子帧与信息编码子帧的周期与长度、信息编码方式等，第二阶段根据第一阶段的通信参数进行基于无线感知方式的通信。信道状态估计序列可以采用固定长度或可变长度的伪随机序列，采用二进制 ASCII 码或 GB2312-80B 码的随机序列，可以实现语义层面的信道估计。

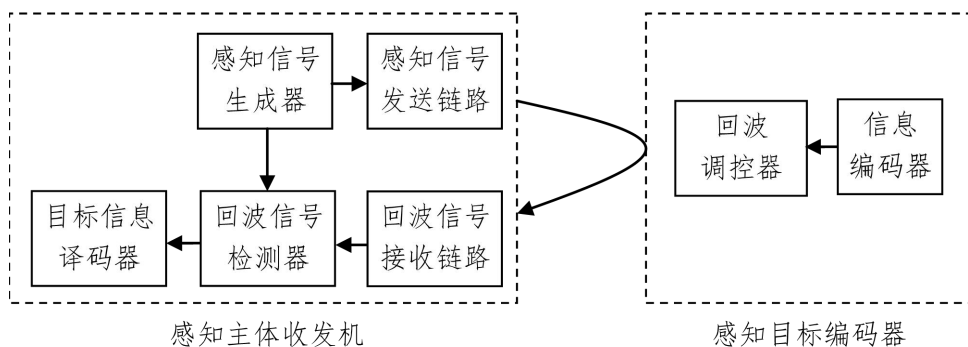


图 13. 基于无线感知方式的通信系统结构

4.2 AI 空口

AI 空口是基于端到端 AI/ML 技术设计，具有无线环境、硬件、数据和应用的自适应能力的无线传输技术，如图 14 所示。相对于传统空口，AI 空口不仅仅用来可靠的传输比特信息，更重要的是基于空口所需数据以一种优化的方式成为空口应用。

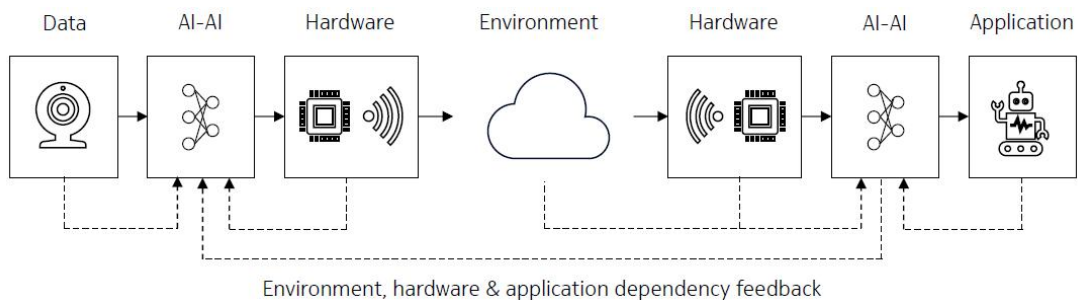


图 14. 基于内生 AI 的空口概念 (AI-AI)

AI 空口不再解耦信源编码与信道编码，也不解耦数据传递与应用的预期用途，接受硬件限制和通信通道的影响，而不是采用抑制方案。6G AI 空口可做如下分类并具有不同层度的优势：

- 第一，与单一的经典波形选择（如 5G 中的 OFDM）相比，AI 空口可以学习不同频率的定制波形，这不仅可以更有效地利用频谱，还可以最佳地适应收发器硬件和信道的实际限制，如非线性功率放大器，混合模拟数字处理，较低量化精度，非常短的通道相干时间和带宽，相位和脉冲噪声。此外，还可以使用 ML 学习或优化新的调制方案、导频序列和编码，增强频谱利用性能。
- 第二，具备充分学习能力的收发机不再需要经历昂贵和耗时的传统算法设计和硬件实现过程。它可以直接针对目标硬件平台进行训练（甚至可以在该平台上进行训练）。这种多功能性对于预期 6G 用例的日益丰富多样性和小规模子网络的出现至关重要，其中 6G 可以以最佳方式满足每个单独的用例和部署场景。
- 第三，越是遵循基于学习的设计和规范的 AI 空口原则，就越不需要标准化。当前的 5G 规范拥有针对不同频段和场景的非常丰富的选项和参数集，从实现角度来看，这是一个困难的挑战。不希望将此方法扩展到 6G 更复杂和多样化的设置中。另一方面，如果只有一个足够灵活的空口学习框架被标准化，系统可以自动适应任何类型的场景。即便有点一厢情愿，人们还是希望 6G 能够成为最后一个标准化的通信系统。
- 第四，AI 空口允许将数据和使用数据的应用程序集成到单个端到端学习过程中。AI 空口不再仅仅解决可靠传输比特的的问题（A 级），而是同时解决通信的语义（B 级）和有效性（C 级）问题。虽然后一个方面可能不适用于通用互联网通信场景，但它们与为特定目的定制并在单个实体控制下的通信系统相关，例如用于传感、监视和机器人控制的工业通信系统。
- 第五，端到端学习的思想自然延伸到 MAC 层，可以用来优化信令方案和信道接入策略，这些方案和策略根据用例和环境平滑地从竞争模式过

- 渡到调度模式。协议学习还可以解决通信和传感(或其他无线信号应用)
- 资源复用优化的问题。当然，物理层和 MAC 层可以一起学习进一步提升性能。

传统蜂窝通信系统以其特定的时间迭代技术为标志。在 6G 时代， AI/ML 将在 6G 网络的设计、部署和运营阶段的端到端开发中发挥决定性作用。因此，必须重新审视香农和维纳(以及其他许多人)在过去几十年中实现科学突破的经典方法，并开发新理论，以实现可能的 6G 系统所需的技术突破。

4.3 关键技术

4.3.1 学习型收发机

实现 6G AI-AI 存在三个重要阶段，如图 15 所示。第一阶段：ML 将用于增强或替换一些处理块，主要是在接收器中，这一阶段目前已经在业界中出现。例如，物理随机接入信道检测、信道估计或符号解映射。第二阶段：ML 模型具有更多的功能，它承担了多个处理块的联合角色。例如，这可以是联合信道估计、均衡和解映射。这一阶段 ML 模型将变得更大，硬件加速变得越来越重要，供应商需要承诺采用“仅 ML/ML 优先”的方法，因为由于功耗和成本的增加，在同一处理平台上并行实施 ML 和非 ML 备份解决方案是不可行的。这意味着 ML 也更受信任，尽管大型模型的内部工作不易解释，但潜在收益也更高。第三阶段：ML/AI 具有更多自由，自己设计部分物理层和 MAC 层。这代表了通信系统设计方式的另一个范式变化，因为并非 PHY 和 MAC 层的所有方面都可以预先固定。这种方法需要新形式的信号和程序来支持分布式端到端训练。例如，与其指定调制方案和波形，不如指定可用于在部署时优化空中接口这些方面的程序。这显然是以前没有人做过的事情，需要对通信系统的标准化方式进行重大改变。

前两个阶段不需要任何新的信令或流程，因为它们只影响收发机算法的实现。下面分析上述三阶段的 AI 空口 BER 性能，如图 16 所示。

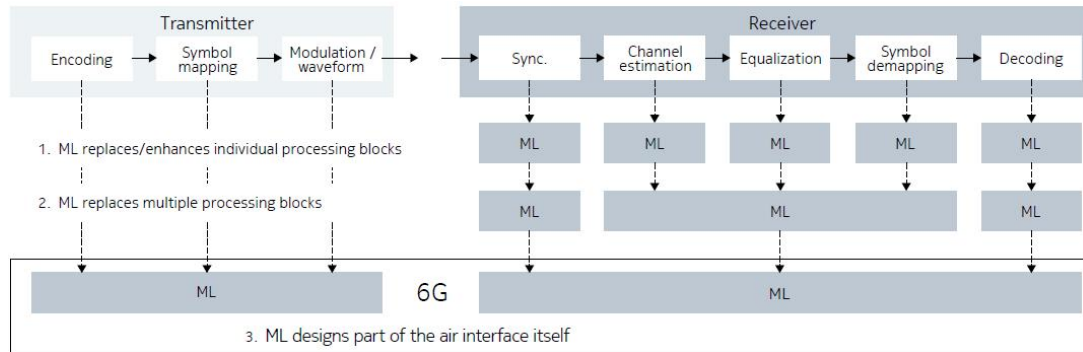


图 15. 实现 AI-AI 的三个阶段

在案例研究中，考虑了载频为 3.5 GHz、TDL-A 功率延迟剖面 and 延迟扩展为 100 ns 的双选单输入单输出（SISO）信道。假设接收机以 50 km/h 的速度移动，信道根据 Jakes 模型随时间演化。我们考虑基于循环前缀的 OFDM，包含 72 个子载波，载波间距 30 kHz，传输时间间隔（TTI）为 14 个连续 OFDM 符号，其中包含 5G 编码的代码产生的长度为 1024 比特的码率为 2/3 的码字。

非 ML 方案作为基准，假设 64 QAM、在第三和第十二 OFDM 符号上每隔一个子载波上发送的导频、最小二乘信道估计、基于最近导频的均衡、精确解映射到对数似然比（LLR）（假设高斯后均衡信道），以及一个标准的可信传播（BP）译码器。可以看到，假设信道状态信息（CSI）完美，基准方案和接收机之间大约有 3 dB 性能差距。现在介绍基于 ML 增强接收机处理来缩小这一差距的方法。由于信道老化和不完善的信道估计，馈送到解映射器的均衡后符号的质量在 TTI 内的资源单元（REs）格上发生变化。第一种解决方案是为每个 RE（第 1 阶段）学习一个定制的神经解映射器。图 16 中带有标记的红线显示了这种方案的误码率性能。正如预期的那样，通过计算更好的 LLR，相比基线性能提高 0.5 dB 增益，但不能补偿信道老化，这会导致均衡星座的旋转和缩放。

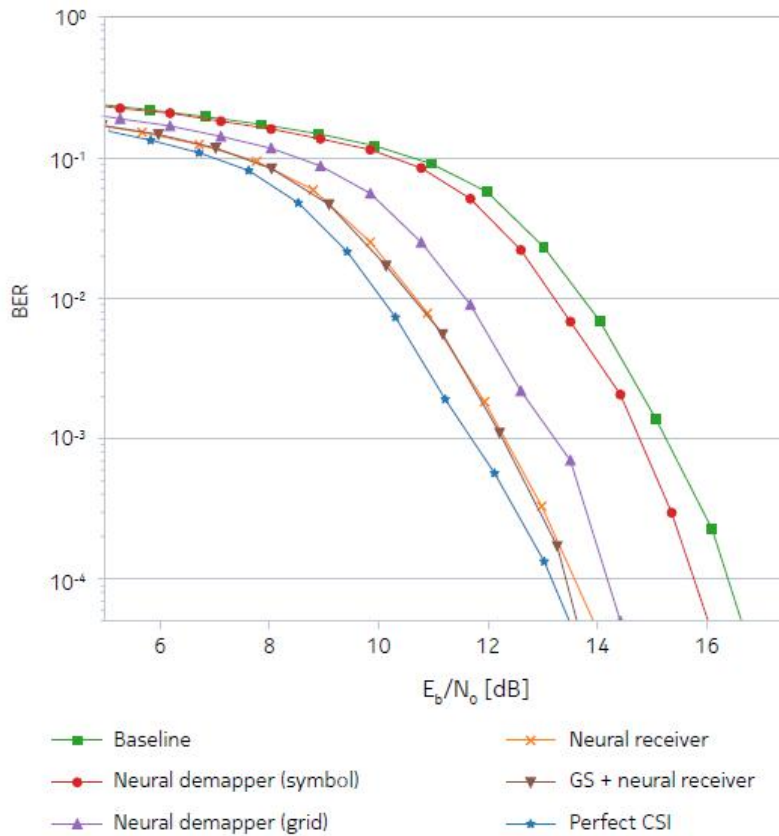


图 16. 不同阶段 AI-AI 方案 BER 性能比较

为克服这些缺点，可以使用更大的神经解映射器，它不逐个符号操作，而是为整个 TTI 生成 LLR。[1]和[2]显示，具有扩展的可分离卷积的完全卷积 ResNet 体系结构在该任务中实现了显著的性能（见图 17）。通过访问均衡后符号的完整 TTI，学习型解映射器可以补偿信道估计器和均衡器产生的一些错误，相对基准性能提升 2 dB（参见图 16 中带三角形标记的紫色线）。

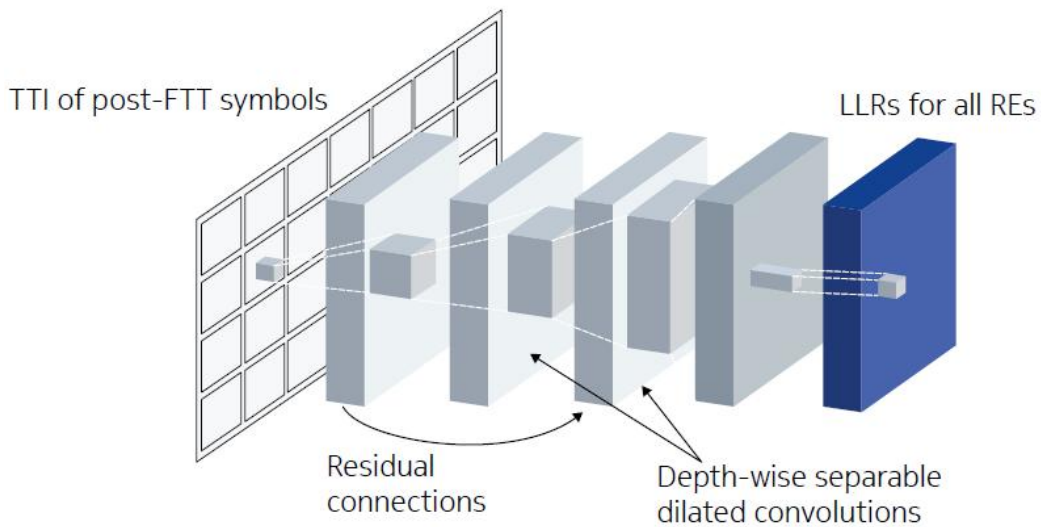


图 17. 学习型接收器为 FFT 后符号的整个 TTI 生成 LLR

有趣的是，可以将信道估计、信道均衡和解映射的联合任务分配给具有类似体系结构的神经网络（第 2 阶段）。它被馈送 FFT 后接收信号的 TTI，从该 TTI 直接计算所有符号的 LLR。除了学习型解映射器的增益外，该神经接收机现在能够执行数据辅助信道估计和检测，从而产生额外的 0.5 dB 增益。通过增加模型复杂度和系统规模（更多的子载波和 OFDM 符号），可以使性能逼近完美 CSI。

最后，分析发射机侧（第 3 阶段）的学习星座（即几何成形（GS））的性能增益，该星座与神经接收机一起进行优化。图 18 显示了该星座图，它用于每个 RE，而不是基线发送的导频和 64-QAM 符号的混合。从图 18 可以看出，该系统实现了与使用 64-QAM 的神经接收机相同的误码率，但具有零导频优势。

这个案例研究仅仅触及了未来可能发生事情的表面。未来研究的有趣方向包括针对新波形的端到端学习、受限硬件、短包消息，以及针对特定应用的联合信源-信道编码。元学习、迁移学习和联邦学习是推动这些方向切实可行的关键技术。

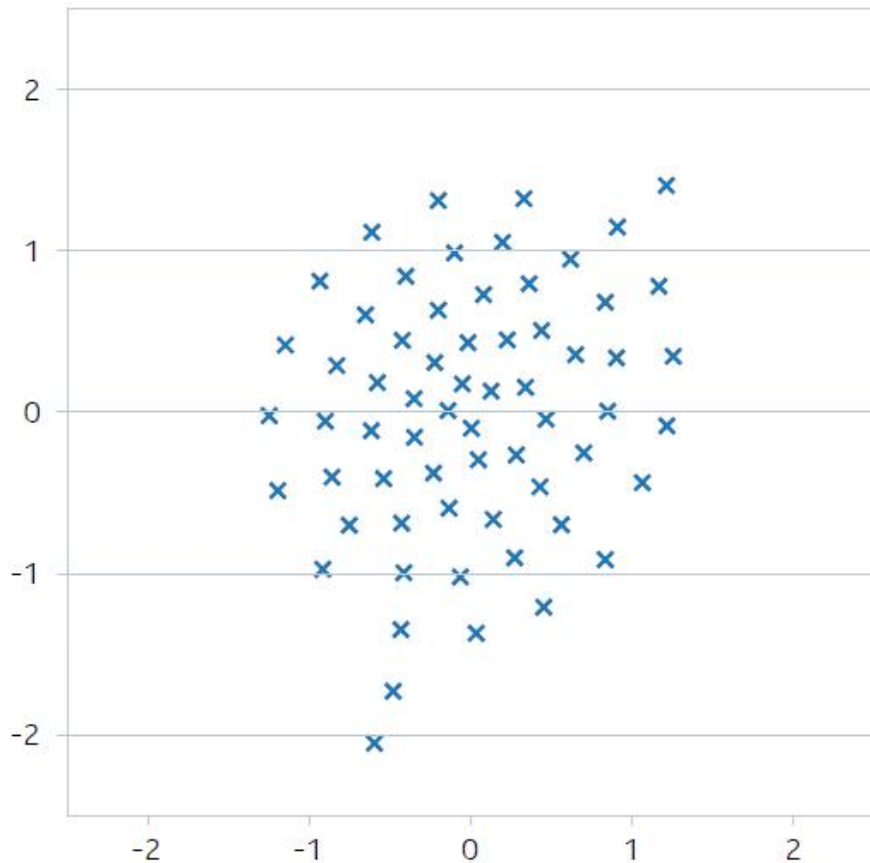


图 18. 支持无导频传输的学习型接收机的星座图

4.3.2 基于无线感知的无线通信

基于无线感知的无线通信是通感融合中，使用感知辅助、反哺或替代通信的技术范畴。一方面，随着高频率通信、大规模天线通信和智能超表面等技术的引入，通信系统参数配置需要感知更多维度信息，感知辅助能力更加重要。另一方面，感知能力的提升可以直接实现通信功能，开辟无线通信新途径。

在感知辅助通信中，可以优先将感知数据应用到超大规模天线的应用中，如图 19 所示，通过精准的位置信息或者成像信息进行波束的调整等，从而提升波束的对准能力，可以提升用户的吞吐量并节省由于遮挡等造成的时延。在感知辅助波束管理流程中，终端间可通过感知协同的方式获取终端的波束调整信息，并将此信息添加到波束上报列表中，实现网络侧提前选择最佳波束。此外利用回波感知信息可辅助网络侧快速判断预测终端是否被障碍物等阻塞，在终端发起波束恢复流程之前即可主动启动波束切换流程。从而降低波束管理中的参考信号及测量上报开销、减少切换时延、提高波束恢复成功率等。

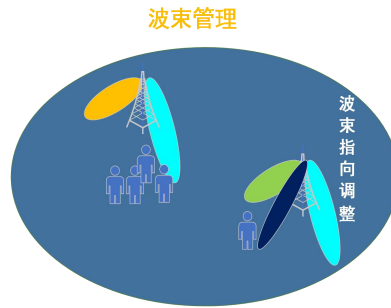


图 19 基于感知的超大规模天线波束管理

智能反射面（IRS，或称智能超表面 RIS）也是典型的感知辅助通信的技术案例。它通过感知并迭代更新定位或信道状态信息，动态调整相位、振幅、频率和极化等电磁波参数来塑造和控制环境的电磁响应，实现对干扰的调整及遮挡物的避让，提升通信吞吐量和时延性能。在感知过程中，IRS 还可以发挥智能中继功能，提升感知信号接收质量。

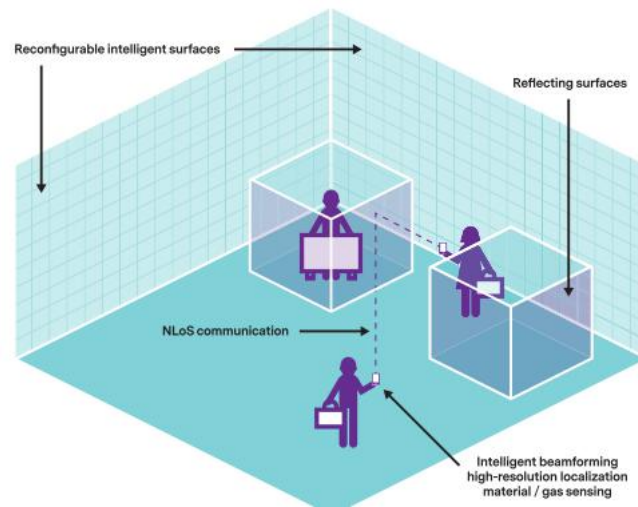


图 20. IRS 的工作示意图

无线感知还可以赋能无线物理层保密通信。基于香农保密容量的物理层安全传输方案依赖于发送端具有攻击信道的全部知识，这一假设在实际中难以满足，制约了物理层保密通信的实际应用。6G 毫米波 MIMO 通感一体化可以装配电磁环境地图，利用感知能力准确感知通信方向附近的潜在攻击者物理位置，并借助 AI 预测敌手的信号状况，根据合法通信双方的实时信道状况进行最优安全编码调制，实现具有香农完善保密性的物理层安全传输，可应用于 6G 高安全性工业

应用、自动驾驶等场景。

4.3.3 基于无线通信的无线感知

基于无线通信的无线感知技术可充分利用通信发送设备与通信相关信号，以较低的系统复杂度实现部分感知功能，包括零发送设计以及合作感知两类。

零发送设计又称为非接触感知技术，是指接收端自动从无线通信数据中学习信号变化模式或特征，从而感知引起信号变化的周围环境或目标行为活动的技术。非接触感知可以引入菲涅尔区模型，用来刻画收发设备位置、目标物体的状态与无线接收信号之间的关系。这种关系揭示了环境参数对无线信号时域特征与频域特征的影响，以及感知目标状态的机理与极限。基于宏蜂窝无线信号，非接触感知可以实现天气检测，多地基雷达可以实现远距离无人机等目标检测。利用在短距无线信号覆盖场景中，非接触感知还可实现细粒度的唇语识别、击键检测、呼吸与异常动作检测等。WIFI 感知也是这一类的技术。这类技术仅需接收端设计，系统成本较低。

相对于零发送设计，在无线信号中设计插入一定格式的感知信号，可以进一步扩展增强感知功能。5G NR 定义了基于定位参考信号的合作式无线定位技术。基站或者终端通过检测参考信号的传播时延、入射角、出射角、多普勒频偏等信息实现定位或测速。同时，可以考虑复用通信资源实现感知功能，比如复用时隙中的灵活符号为感知符号完成感知功能，并通过规定帧结构配置信令优先级，可确保感知功能不干扰或抢占正常的通信资源，实现了感知和通信功能的按需时隙灵活动态配置。

4.3.4 多频段融合组网

6GHz 以下的频谱已经分配殆尽，26GHz、39GHz 的毫米波频段也分配给 5G 使用，为保证新一代无线网络覆盖、降低部署成本，低频谱资源的持续开发和高效利用至关重要，同时，为满足更丰富场景、更高容量和超高体验速率的需求，需研究更高频段的通信技术，如毫米波、太赫兹和可见光等。从新一代移动通信网络的部署来看，将支持更丰富的应用场景和业务需求，多种高低频段融合组网通信将成为未来移动通信网络的必然发展趋势。

由于新一代无线网络引入了毫米波、太赫兹、可见光等更高频段以及全新的业务场景，多频段的协同组网变得更加复杂，例如分布式协同组网、空天地一体化网络、低频段/毫米波/可见光/太赫兹融合组网等。多频段融合组网技术期望针对不同组网场景形成一个总体架构设计的思路 and 原则，在此总体思路 and 原则下，结合场景研究有差异化的组网架构和技术方案。

如图 21 所示的基于空天地一体化的多频段融合组网示意图。在此架构下，6G 网络向更高频段拓展，其中中低频段例如 10GHz 以下频段可采用连续大带宽提供基础网络覆盖，支持无缝的地面覆盖网络部署，保障基础的业务能力提升；此外支持全频段接入，根据业务需求，按需部署与动态开启毫米波、太赫兹和可见光等高频段，以满足超高速率、超大容量的业务需求。

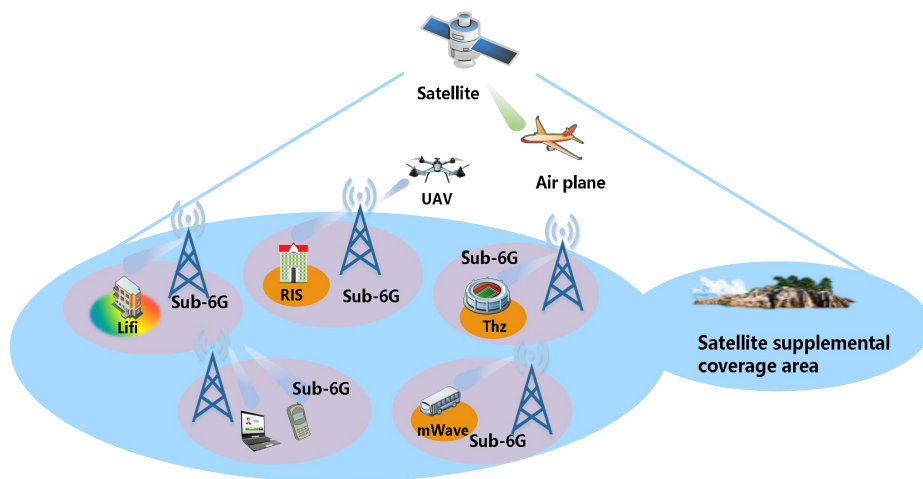


图 21. 基于空天地一体化的多频段融合组网

但这些新的组网方式也将带来新的技术挑战，需要更加智能、高效的融合组网方案。一是融合毫米波、太赫兹、可见光等更高频段后，组网架构相比 5G 可能发生变化，带来网络干扰场景复杂、网络运营维护困难等问题；二是多频段融合组网可实现各个频段的动态互补，优化全网整体服务质量、提高网络频谱效率，但从降低能耗、成本等需求出发，需要智能化的提升机制；三是多频谱融合组网对终端能力提出了更高的要求，需要分析不同组网场景下的终端能力需求。

5. ICDT 融合的 6G 终端

ICDT 融合的 6G 能力将为未来的移动终端带来一系列新功能，预期带来移动终端的新变革。移动终端一方面从个人终端向行业终端扩展，一方面向无人车、无人机、机器人等智能泛终端延伸，另一方面向智能交互、柔性化、可植入、模块化等新能力与新形态升级，具有更强的环境适应性和业务应用能力。到 2030 年，终端将集成触觉反馈、感知和成像、全息影像、AI 及其它功能。这些全新的功能正在重新定义终端设备以及它们在我们生活中扮演的角色，移动终端正在不断演进以具备以下能力：

- 人类水平的感知，如为人类水平的视觉/音频感知和高保真人-人通信提供无线带宽；
- 环境感知，如多光谱成像和高精度定位能力；
- 人-网交互，如用于人与数字世界交互的全息近眼显示器；
- 能量收集，如无线充电、无线数能同传等。

这些能力将使当前的终端设备演变为超级智能体，带动物理世界以全新的方式接入数字世界，并具备一些超越人类的功能，如无人化终端特有的智能识别和环境感知。

5.1 友好终端

面向 2030 年及以后，预计将有千亿的各类设备需要联网以满足不同场景的多样化需求。千亿设备包括各类传感器（环境监测，工业制造，体域网等），水表电表等，智能家居，可穿戴设备（手表，XR 眼镜等），手机等。当下终端的诸多痛点（功耗、复杂度、覆盖、成本、体积等），在面向 6G 新场景和增强能力时会进一步加剧，成为制约 6G 发展的瓶颈。6G 泛在场景的需求，需要支持极简终端接入，包括‘0’功耗通信；所以急需研究终端友好 6G 技术，为终端减负，“把复杂留给网络，把简单留给用户”。

从终端侧看终端友好：降低终端的功耗、成本和复杂度，支持终端多样性，扩展接入场景和范畴，提升上行效率（能效、谱效），提升用户体验；或者终端

放松某一点的体验，从而带来其他点的更好的体验。

从网络侧看终端友好：提升网络能力，简化终端的相关流程和技术复杂度。

终端友好的具体技术方向包括：

- 天地一体化和多频段融合技术支持终端的广域接入和泛在接入
- 终端原生的组网支持终端灵活的接入
- 通感算融合扩展终端的服务能力
- Cell free 技术支持终端‘0’感知的移动性体验
- Backscatter 和近零功耗接收机支持终端‘0’功率通信
- 新型多址接入支持免调度传输和上行异步传输
- AI 与通信结合提升终端用户体验

5.2 无人化终端

计算能力、AI/ML、半导体技术的发展为更好的计算性能、更高的能效、体积更小的芯片和更高的晶体管密度奠定了基础，加快了无人化终端的实现。无人化终端是指具有独立决策与执行能力的移动终端，包括无人机、无人车、机器人及其他智能化设备。无人化终端是执行无人化业务的载体，具备独立本地感知、计算、通信与 AI 能力，可以面向多样化的无人化环境代替人类执行任务，包括无人驾驶、无人物流、无人制造、无人巡检等。

无人化终端将充分利用下一代 ICDT 6G 融合网络的超高数据速率、超低时延和超高可靠性连接优势，可以实现计算密集型任务到边缘云的卸载，通过利用分布式计算和学习，再借助云中心化和自组织控制（如群体智能和协作决策），达成任务目标。随着 6G 短距离通信技术和 AI/ML 算法的不断发展，无人机群、车队和机器人集群等无人化终端能够进行本地交互，并与环境互动，提高业务体验和生产力。

5.3 柔性终端

柔性电子可概括为将有机/无机材料电子器件制作在柔性或可延性塑料、薄

金属基板上的新兴电子技术，可用于柔性电子显示器、有机发光二极管 OLED、印刷 RFID、薄膜太阳能电池板、电子皮肤、柔性纤维电池等，让终端“有形变无形”，具备新显示与续航能力，使用户获得更加丰富、无感知的体验。

柔性电子工艺关键指标包括芯片特征尺寸和基板面积大小，目标在更大幅面基板上集成特征尺寸更小具有一定密度的柔性电子器件，以比拟传统硅基芯片性能。在基板上制作薄膜晶体管，成本低廉、柔韧更好。柔性电子技术将突破经典硅基电子学的本征局限，可为后摩尔时代终端器件集成、终端能耗、终端应用等带来变革机遇。

将可穿戴电子设备附着到皮肤上可以监测各种生理功能，如心率、心电图、皮肤温度、肢体动作和血压。这些设备广泛应用于体育、军事活动、医疗和日常生活等领域。基于织物传感器阵列的可伸缩触觉手套能够识别单个物体形状，估计物体重量，并在抓握物体时绘制触觉模式。该触觉手套配置 548 个传感器记录手与物体的交互，然后训练一个深度卷积神经网络提取抓握触觉特征。这些特征在机器人和假肢的开发中非常有用。

基于室温下基于碳纳米管（Carbon NanoTube, CNT）薄膜，可开发宽带柔性太赫兹成像可穿戴设备，能够对平坦和弯曲的样品进行被动成像。这些技术将推动便携式太赫兹设备应用于许多领域，包括安全检查和健康监测。使用半导体量子点敏化的石墨烯光电探测器（GQD-PD）可用于柔性的透明可穿戴设备，可以在反射和透射模式下监控心率，或者跟踪人体排放物的变化来监测健康状况。

柔性终端目前主要面临两个挑战。一是力学问题，柔性电子元器件长时间承受交变应力容易开裂；二是电子封装问题，需要开发新技术保障柔性基板上部件集成封装的性能；三是电磁波辐射问题。

5.4 模块化终端

终端能力的不断升级，需要具有开放扩展架构的模块化移动终端架构设计新思路。传统移动终端更新换代导致资源浪费，通过软件、模块升级与按需组合，打造模块化终端新形态，支持多频段、多体制无线接入，以及多功能融合，可实现终端由封闭向开放扩展架构的转变，实现 6G 终端的可持续演进。

将智能手机模块无缝应用于智能电视以增强视频观看体验，可穿戴设备借用智能手机的通信模块直接进行信息收集，随着智慧工厂设备将接入 6G 网络，大量低成本、低功耗的物联网设备将无处不在，模块化终端将为智慧城市和家庭、智慧医疗、污染监控和其它应用提供支持。这些设备将作为集计算、网络 and 物理过程于一身的数字-物理融合系统的传感器和执行器。不仅是智能移动终端，ICDT 融合的网络架构将有助于各类终端设备都能作为传感器和执行器模块。

未来，无线网络连接将成为各类设备的基础能力，在高度沉浸式、多模态人机交互的场景中，多感官能力模块的按需组合，可为人体协同实现更多功能，如克服残疾，从而为人类发展提供更多可能。增强型无线通信模组也将作为模块化终端的重要组成部分，服务于不同用户人群更广泛的通信诉求。用户通过在自己的常用终端上拼接远距离 D2D 模块、无线传感器网络模块、卫星通信模块等，实现野外自组织网络通信、大范围传感器数据收集、无地面网络覆盖区域通信等定制化功能，而不需要更换常用终端。随着终端无线连接能力的发展，终端模块间的连接也将打破物理连接的桎梏，利用电磁、声、光等多种媒介和协议实现协同工作和数据共享。模块化终端的概念将从以设备为中心演进为以人/任务为中心，将服务于人/任务的多设备灵活组网，纳入模块化管理，实现模块间的数据融合、感知融合、算力融合。模块化终端将有助于人与机器、物理世界与数字世界之间的交互更加深入，更灵活地利用 ICDT 融合的 6G 系统使高度可靠、响应迅速的智能连接交换更具表现力。

6. ICDT 融合的 6G 产业

6.1 6G 产业趋势与格局

ICDT 融合的 6G 技术发展，必将带来 ICDT 融合的 6G 产业形态。6G 产业将与集成电路、基础材料、基础软件、计算机、人工智能、大数据等产业融合发展，如图 x 所示。其上游产业从设备制造和产品向集成电路、基础器件扩展，中游向基础设施、各类平台和终端聚合，下游则融合通信应用、AI 应用、互联网

应用、计算机应用，驱动垂直应用、治理应用和个人应用全新升级。

ICDT 产业上游主要是集成电路和基础软件。集成电路产业包括设计、制造、封测三个主体环节，涉及基础原材料、装备和 EDA 工具等供应环节，输出产品主要包括模拟器件、分立器件、专用芯片 ASIC、逻辑器件、存储器、光电子器件、传感器和处理器等，基础软件产业包括开发软件、网络/服务器/终端操作系统和各类工具软件三个领域，与硬件产品一道，作为中游的计算设备、通信设备、感知设备、AI 设备的核心供应。

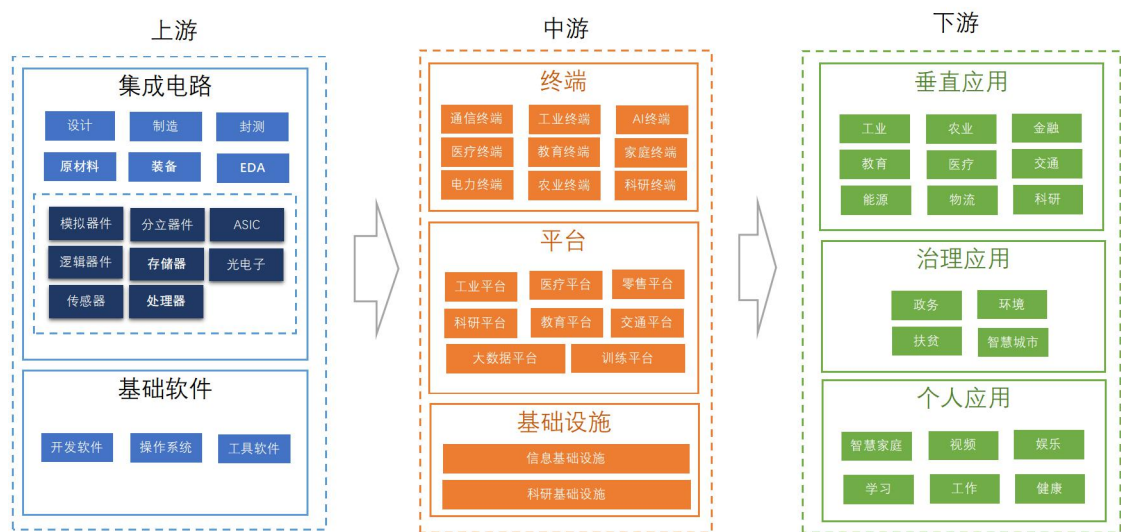


图 x. ICNT 融合的 6G 产业发展趋势

ICNT 产业中游主要是基础设施、能力平台和终端。基础设施包括通信基础设施、算力中心和大数据中心，以及有关联关系的 ICNT 科研基础设施和交通、工业、医疗等公共基础设施。平台是 ICNT 产业核心，包括制造业及大数据平台、医疗及大数据平台、电商及大数据平台、交通及大数据平台、教育及大数据平台、科研及大数据平台，以及 AI 训练平台。终端是 ICNT 中下游的纽带，包括个人终端、行业终端和科研终端，具体有通信终端、工业终端、AI 终端、医疗终端、教育终端、家庭终端、电力终端、农业终端、交通终端和科研终端等。

ICNT 下游主要是个人应用、垂直应用和治理应用三个领域。依托 ICNT 融合的基础设施、平台和终端的升级，三大应用正向着无人化、远程化、沉浸式、智能化、虚拟化方向发展。以“元宇宙”为代表的新生态，将进一步驱动 ICNT 产业聚合，为人类打造革新的生活与生产方式，满足人类对幸福生活的永恒追求。

6. 26G 产业发展建议

ICDT 产业发展，面临诸多的挑战，需要围绕产业政策体系、人才与学科教育体系、科研体系和基础设施，构建产业自循环生态环境。

一是 6G 产业政策体系。

加快 6G 产业政策体系建设。在法律法规、要素流动性、绩效考核等方面发力。完善 6G 法律法规体系。建立 6G 产业知识产权制度。建立 6G 技术与成果评估、交易、孵化平台和 6G 技术需求发榜平台，促进 6G 技术供需对接，以市场化流动性实现技术价值检验与变现。坚持底线与包容并举思路不断修改完善 6G 产业发展配套的法律法规。完善大数据、生物数据的所有权、收益权、安全风险责任、侵权、AI 系统民事主体、AI 损害责任、个人隐私保护、AI 人格权、AI 著作权等。

建立创新型产业要素流动性机制。建立 6G 产业资本、人才、技术畅通渠道，向产业断点、堵点、热点分流引导。优化加大 6G 产业大基金投入力度，重点投入 6G 产业相关的高端芯片和器件的设计与制造、6G 技术研发相关的工具技术、软件和装备技术等薄弱环节（堵点），完善 6G 产业的一级市场和二级市场的投融资平台和环境，促进应用市场（热点）健康发展。建立人才激励制度，设立国家级 6G 人才资质认证、颁发全国绿卡，打通产学研创新链间人才就业障碍，支持双聘多聘。建立支持双链间投融资渠道机制。鼓励企业投资或收购创新链主体机构，创新链主体或科研人员投资企业，支持创新链主体企业化运营，配套投资支持政策。

加强双链融合绩效考核。一是通过一级二级投融资市场法律法规和政策，引导企业加大科技创新投入，对科研人员和科研资金比例、专利数量、行业联盟参与度进行考评；二是加强高校和科研机构成果转化率考核，对聚焦产业薄弱环节攻关并取得突破性成果的科研单位和人员进行与其成果价值匹配的激励。

二是 6G 人才与学科教育体系。

培育建立多层次 6G 人才体系。坚持本土培养与国际回流与引进，保持人才梯队的成长性，满足 6G 创新与产业发展需求。扩大高层次人才规模。扩大 AI

企业家群体。培养或引进 AI 企业家，打造 AI 企业品牌，增强 AI 产业链主体数量和质量。扩大 AI 科学家群体。培养和引进 AI 科学家，打造学术界和产业界知名 AI 团队。建立支持双链间 6G 人才流动机制。鼓励 6G 企业家与科学家多职业角色规划，倡导企业家的科学家精神，科学家的企业家精神；完善多层次多环节人才培养机制，鼓励 6G 课程开设到企业，6G 产品原型论证到高校。

调整优化学科教育体系。重设“新工科”、“新理科”。从本科、研究生、职业教育、技能培训多层次开展 6G 教育。扩大高校 6G 相关学科教育规模。国内 6G 本科教育规模不断扩大，但是刚起步，6G 人才仍然供不应求。进一步发展培养高校教师队伍，尤其是 6G 学科领域国际知名教授，扩大教师群体规模，保障 6G

学科教学的稳定性，但容许教师双聘或多聘参与 6G 创新载体的科研活动；二是优化 6G 教育资源，进一步扩大集成电路、AI 课程设置比例，加强 AI 关键算法与技术教学，又注重“AI+”应用技术教学，多层培养学术和产业所需的 AI 人才；加快落实 AI 高层次人才培养专项行动，产教融合，提升 AI 研究生数量和质量；

坚持 6G 人才全球化培养与竞争。继续畅通国际交流渠道，鼓励学生到 6G 优势高校深造，通过国内 6G 产业政策红利、市场红利和产业机会，积极吸引留学生回国或通过他们强化国际合作，促进全球 6G 技术与产业全球化生态建设，避免人才脱钩。

三是 6G 产业分类体系。

进一步重构国家产业分类体系四级架构。一是细化分类体系，设置 5 级或 6 级目录，进一步细分 6G 市场，挖掘 6G 产业自身需求，提升需求质量，避免枝多叶少。二是从横向分类转向纵向价值链分类并重，细化 6G 产业上游分类，尤其是定义影响 6G 产业供应链质量的关键小类，包括 6G 产业重大装备、设备的零部件、材料的细分小类，避免树大根浅。

建立 6G 产业分级机制，全力保障 28nm 产业内循环能力。根据 6G 产业现状与发展前景，对产业进行断点、堵点和热点三个维度的分级分类规划与推进。充分利用新基建和工业/医疗/金融/电信等产业大数据优势，市场规模优势，产业存量能力，保障产业成长性，分阶段向更高产业级别推进。以可控的产业能力扩

大 6G 产业热点环节容量，以热点发展促进产业堵点疏通，基于产业自身韧性和资源长期投入修补产业断点或换道发展。引导 6G 企业差异化战略定位，根据产业等级聚焦主业，避免过度同质竞争。

四是 6G 科研体系。

多层次设置 6G 科研项目体系。一是在供应链风险环节（断点），成立国家级创新载体，设立“揭榜挂帅”项目；二是在产业链薄弱环节（堵点），设立产业基金项目，设立产业集群基地，发挥链主带动作用；三是在价值链优势环节（热点），设立应用示范试点类科技专项，加强垂直应用深度。

建立新型项目组织实施方式。一是建立新型创新载体，整合优势创新资源联合攻关，重建国家（重点）实验室、创新中心、技术示范区。二是创新项目考核方式，引进“对赌协议”模式，对项目成果设置重大奖励预期。

五是 6G 基础设施。

建设 6G 产业创新融合集群基地。在 6G 新基建中重点规划国家级双链融合集群基地，在 6G 教育与科研结构优势区域建设 6G 产业基地，在 6G 产业优势区域加强 6G 科学教育与科研机构设置，利用集群效应提升生产与创新效率。在集群基地成立国家级/产业级技术示范区、与地方经济协同规划，融为一体，优化 6G 产业空间结构，形成区域集群效应和竞争优势。

建设 6G 国家级平台、大数据平台、算力中心。建立国家级科学试验平台。建立医疗平台，支持远程医疗和移动健康服务。建立交通平台，支持自动驾驶服务。建立工业和制造平台。研发数控机床编程、芯片设计查错、质量检测等 AI 应用产品。建立政务、民生、环境、农业平台。建立国家级大数据平台、模型库与训练中心。

7. 结束语

移动通信技术与计算技术、感知技术、AI 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新概念、新技术和新方案。与此同时，通信产业也将与计算产业、感知产业和 AI 产业融合发展，正在形成新的产业格局，催生更加丰富的终端形态和下游应用。相信通过 6G 创新链与产业链资源要素聚合，一定能构建出强大的 6G 端到端信息处理与服务能力。

致 谢

责任编辑：易芝玲，潘成康

中国移动：潘成康、王爱玲、王亚娟、马良、金婧、王启星、孙军帅

爱立信：范锐

诺基亚贝尔：王泽权

小米：朱亚军

联通：马静艳、刘珊、杨艳

北邮：崔琪楣

西电：刘俊宇、文娟、白卫岗、承楠、杨春刚、欧阳颖、宋延博、张露露

中兴：葛林娜、郁光辉、朱清华、孟溪

DOCOMO：王新

参考文献

- [1] M. Honkala, D. Korpi, and J. M. Huttunen, “DeepRx: Fully convolutional deep learning receiver,” arXiv:2005.01494, May 2020.
- [2] F. Ait Aoudia and J. Hoydis, “End-to-end Learning for OFDM: From neural receivers to pilotless communication,” arXiv:2009.05261, Sep. 2020.
- [3] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang,



- “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019.
- [4] J. Hu, H. Zhang, B. Di, L. Li, L. Song, Y. Li, Z. Han, and H. V. Poor, “Reconfigurable intelligent surfaces based RF sensing: Design, optimization, and implementation,” 2019, arXiv:1912.09198. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1912.09198>
- [5] C. De Lima et al., "Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26902-26925, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053486.

缩略语

AI	Artificial Intelligence
ATs	Autonomous Things

