



6G通感算一体化网络架构和关键技术研究*

王友祥¹, 裴郁杉¹, 黄蓉¹, 唐雄燕¹, 卢琰琳²

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;
2. 中国联合网络通信有限公司上海市分公司, 上海 200082)

【摘要】 面向2030及未来, 融合通信、感知和计算的6G网络成为社会数字化转型的基础。目前业界更多的开展通信感知一体化的研究工作, 因此从网络系统架构设计和应用部署的角度出发, 提出了通感算一体化网络架构设计方案, 并介绍了系统功能、无线空口设计、多模态协同感知、算力供给、业务编排、网络调度、安全等关键技术; 最后给出了面向通感算一体化服务的网络和服务性能指标体系设计。

【关键词】 6G; 6G网络架构; 通感算一体网络架构; 通感融合; 通算融合

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.20230904-0002 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2023)09-0002-09

引用格式: 王友祥, 裴郁杉, 黄蓉, 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(9): 2-10.

WANG Youxiang, PEI Yushan, HUANG Rong, et al. Network Architecture and Key Technologies for 6G Integrated Communication, Sensing and Computing[J]. Mobile Communications, 2023, 47(9): 2-10.

OSID:



扫描二维码
与作者交流

Network Architecture and Key Technologies for 6G Integrated Communication, Sensing and Computing

WANG Youxiang¹, PEI Yushan¹, HUANG Rong¹, TANG Xiongyan¹, LU Yanlin²

(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China;
2. Shanghai Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

【Abstract】 In the Perspective of 2030 and Beyond, the 6G Network with integrated sensing, communication and computing becomes the foundation for societal digital transformation. Currently, the industry is mainly focused on research related to integrated communication and sensing. Therefore, this paper, from the vantage point of network system architecture design and application deployment, presents a comprehensive design scheme for an integrated sensing, communication, and computing network. The paper introduces key aspects such as system functionality, wireless air interface design, multi-modal collaborative sensing, computational resource provisioning, service orchestration, network scheduling, security, and more. Finally, the paper presents a performance evaluation framework tailored for networks and services oriented towards integrated sensing, communication, and computing.

【Keywords】 6G; 6G network architecture; integrated sensing, communication and computing network architecture; integrated sensing and communication; integrated communication and computing

0 引言

根据ITU-R“IMT 面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书”^[1], 未来6G将包含沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、通信与智能融合、感知与通

信融合、泛在连接等6G六大典型应用场景。通过与其他技术的结合, 如先进计算、人工智能、大数据、区块链等, 6G将实现网络性能和服务能力跃升, 全面引领经济社会数字化智能化绿色化转型^[2]。

6G典型应用场景将在5G三大场景基础上进行了增强和扩展, 提供新的服务能力和应用价值。一方面, 6G将在5G三大通信使用场景基础上不断扩展, 以可持续发展的方式拓展移动通信能力边界; 另一方面, 6G也将扩展到通信使用场景之外, 引入人工智能、感知、计算等

收稿日期: 2023-08-15

*基金项目: 国家重点研发计划“6G智简网络架构与自治技术研究项目”(2022YFB2902103); 国家重点研发计划“国家级城市群一体化新一代信息基础设施建设与示范项目”(2020YFB2104203)

服务场景。未来,6G能够实现人、机、物的泛在智能连接、物理世界和虚拟世界的融合交互,成为承载新用户、赋能新应用的新型数字信息基础设施。

1 6G通感算一体化应用场景

1.1 通信服务

通信服务是移动通信网络的基础业务。6G网络作为5G网络的继承者,在网络能力上将会大幅度提高,可以实现更高的传输速率、更低的传输时延、更大的用户接入能力,还将具备智慧内生、多维感知、安全内生等能力,将超越5G现有的个性化通信服务,满足未来人们对通信服务的所有需求。6G网络的服务区域也将会从地面扩展至空天地海,实现立体的无缝连接覆盖,随时随地满足安全可靠的“人、机、物”无限连接需求。同时,6G将持续拓展移动通信能力边界,全面引领经济社会数字化、智能化和绿色化转型,最终实现“万物智联、数字孪生”的美好愿景^[3]。

1.2 感知服务

6G网络通过利用通信信号实现对电波传播环境以及其中目标物的检测、定位、识别、成像等感知功能,获取相关信息并智能分配网络资源,提供感知服务。

从感知方式上,根据是否主动发射用于感知的电磁波,可将6G感知分为主动感知与被动感知。主动感知是指感知者主动发射电磁波,经目标对象反射后,感知者接收回波信号,进行处理分析感知。被动感知是指感知者通过接收来自目标对象的电磁波(目标对象主动发射电磁波或者反射其他电磁波)进行感知。根据感知者与感知目标对象是否进行信息交互,可将感知分为交互感知与非交互感知,其中交互感知是指双方对用于感知的电磁波的信息进行交互^[5]。此外,6G网络还需要支持其他模式的感知信息协同:如温度计、湿度计、气压计、陀螺仪、加速度计、重力传感器等接触式感知,以及光感知、声感知等非接触式感知,从而能够提供更加丰富的感知服务。从6G网络本身考虑,感知服务可以分为对外感知服务和对内感知服务两大类。对外感知是指感知网络外部环境和物体,包括物理环境(目标运动状态检测与识别、目标成像等)等,基于感知能够提供的服务包括高精度定位、高分辨率成像、参数测量等。对内感知是指感知6G网络自身运行状态等,包括网元设备运行状态、资源使用情况、不同业务的需求等^[7]。

1.3 计算服务

随着产业和社会的数字化进程加快,“算力”作为数

字社会的生产要素,其需求将呈现指数级增长的趋势,6G网络引入新的资源维度,包括多样性的算力资源、计算模型等,以实现多维资源聚合,协同提供计算服务。

根据服务对象的不同,计算服务可以分为对外和对内两种。未来很多应用对网络性能的要求极高,如全息通信、协作机器人、沉浸式XR(Extended Reality,扩展现实)、3D虚拟现实等,同时这些应用也是计算密集型业务,因此6G网络必须按需提供实时的计算服务,将终端侧、边缘侧、网络侧和云端的多维计算资源通过网络化的方式进行协同管理、灵活调度,保障业务的服务质量。对内服务主要是面向6G网络自身的多维度、非线性等复杂问题的高效计算服务,以实现网络本身的智能管控、资源编排与优化,并实现全域全量数据关联的数字化运维和端到端的QoS(Quality of Service,服务质量)感知保障,提升网络智能化水平,提高业务服务能力和资源使用效率。

1.4 通信感知计算一体化

未来,智能交互、智能交通、智慧工业、无人机探测等新型业务场景不断涌现,6G网络需要打造与通信融合一体的感知、计算、安全等全新能力。通信感知一体化技术将利用无线通信信号,实现对目标的检测、定位、识别、成像等感知功能,进而获取和重构周围的环境信息,构建与物理世界融合的数字世界^[3]。国内中国通信标准化协会(CCSA, China Communication Standards Association)和IMT-2030(6G)也在积极开展通信、感知、计算融合的需求、技术和架构等方面研究^[4-5]。文献[6]提出了通感算融合的系统架构及关键特征,给出了面向通感算融合的数据面和面向通算融合的基本流程。文献[7]设计了集成主管用户需求和可观环境需求的6G通感算资源按需调配架构,实现资源的高效按需配置。

6G系统通过感知服务对物理世界进行采样同时构建数字世界,通过通信服务为物理世界提供连接,通过计算服务对通信和感知的过程和数据进行处理。利用软硬件资源的协同与共享,通信、感知和计算融合一体可以实现多维感知、协作通信、智能计算功能的深度融合和互惠增强,从而能够观测并对物理世界进行采样,开启物理世界与数字世界融合的通道,提供定位、测距、成像等多元化能力,极大满足超高分辨率和精度的应用需求,如包括产业升级领域中的位置感知、无人监控、环境重构等,社会治理领域的环境监测、危险物品探测等,智慧生活领域的手势和动作识别、安防监控、行为监测、健康监测等。

当通信、感知、计算是相互独立的系统和功能时,它们

服务的目标对象均是系统外部的客户或者消费者。未来 6G 系统的感知和计算功能，不仅可以提供对外的业务服务，同时也可以服务于 6G 网络本身。若将感知和计算（包含 AI（Artificial Intelligence，人工智能））分别视为一种工具，协同通信功能，三者之间可以相互辅助、功能增强。通过对业务需求（传输速率、算力要求、性能指标等）、网络物理与数字空间状态（网元设备运行状态、孪生网络运行状态、计算资源负荷等）等进行感知，从而实现业务加载时的预配置和动态调整，提升 6G 网络的通信能力；并根据对计算资源和计算服务的部署位置、实时状态、负载信息和业务需求的感知，合理分配计算任务，实现高效计算服务。

2 6G通感算一体化面临的挑战

2.1 频谱挑战

6G 通感算一体化服务要求在同一个设备、相同频谱上同时支持通信和感知服务，并能够提供实时的计算能力，未来可以进一步支持无线传能服务，然而通信系统的频谱资源是有限的，多业务的频谱共用对运营商提出了挑战。

1) 6G 网络拥有海量的节点，包括网络侧设备和用户侧设备，通感算一体化的服务将产生大量的感知数据、模型数据和网络信息数据的传输需求。同时，无线空口的感知功能引入了感知链路，新功能的引入会带来严重的干扰问题和资源拥挤，对运营商有限的频谱资源提出了严峻挑战。

2) 6G 通信和感知在波形设计、波束赋形、覆盖强度等方面具有不同的性能目标和要求，此外，6G 感知业务需要同时支持导航、模式识别、成像、运动、重构等多类型业务，并可按时、按区域的进行管控，实现不同精度的感知性能。因此，运营商需要结合不同频段的物理特性，灵活设计频率使用策略，以满足不同业务的性能要求，同时网络的运营复杂度和维护成本会大幅增加。

2.2 能效挑战

根据主设备厂家基站设备的测试结果，2019 年 5G 的单位比特能耗是 4G 的 20%，但由于 5G 峰值速率的提升，5G 单站的能耗是 4G 单站的 4 倍。随着技术的发展进步，5G 系统的能耗有所降低，预测 2025 年 5G 的单站能耗仍将为 4G 单站的 2 倍^[8-9]。未来 6G 的频段更高、蜂窝更密，感知和计算服务带来海量感知数据的获取、处理和传输引入更多的能耗开销，如何“减碳”也是 6G 研究的重点。

2.3 安全挑战

6G 通感算一体化架构构成了数据驱动的网络智能闭

环系统。感知产生数据、通信传输数据、数据计算处理产生结果进行自动决策以提升网络性能或作为服务提供给上层应用。因此，6G 网络及其承载的海量数据的安全是上层应用安全和可信的基础。由于感知和计算等新能力的引入，以及人工智能、大数据、云计算等新技术的使用，如何构建安全可信的网络面临数据和网络安全两方面的挑战。通感算一体化涉及大量数据的采集、传输、处理、存储和共享。这些数据可能涉及个人身份信息、位置信息和其他敏感数据。由于网络感知和算力的分布特征，数据隐私安全面临新的挑战。通感算一体化涉及多种内生能力的融合集成，网络功能的融合同时也带来更多的安全风险，攻击者可能利用网络的漏洞、弱点或错误配置入侵系统，破坏系统功能。此外，6G 通感算一体化依赖于大量的无线感知能力和分布的算力供给设备，分布式的网络形态增加了攻击者伪造、篡改的风险，因此也需要增加内生安全机制确保设备的身份和完整性验证，以检测和防止假冒攻击。

2.4 性能评估

6G 新服务能力的引入，使得传统网络中以速率、时延、频谱效率等为代表的单一通信指标体系已无法完整、系统地评价网络性能。另一方面，不同的应用场景对于 6G 网络的服务能力要求不同，业务需求也具有很大的差异性。如果仍采用传统网络中的性能指标的绝对值来评价网络性能，极有可能会造成网络功能和资源的浪费；而由于业务种类的多样性，网络评价指标也难以归一化。因此运营商需要建立一套全新的网络和服务评价体系，既能够有效地评价网络提供通信感知计算一体化服务的业务体验与扩展能力，又不会将网络导向“全量化”的部署方式。

3 6G通感算一体化网络架构

6G 通感算一体化网络架构具有统一、灵活、弹性、即插即用的特性，网络功能和接口协议通过原生设计的方式支持感知能力、计算能力等，并与传统的通信功能协同，通过管控层实现资源的高效统一管理和智能协同编排，从而提供一体化的服务功能和端到端的 SLA（Service Level Agreement，服务等级协议）保障。图 1 为 6G 通信感知计算一体化网络架构。

3.1 资源层

为所有上层功能提供运行和服务支撑，除了传统网络建设所需的网络、计算、存储、频谱等资源外，还需要面向感知数据采集、感知数据处理等业务引入智能计算设

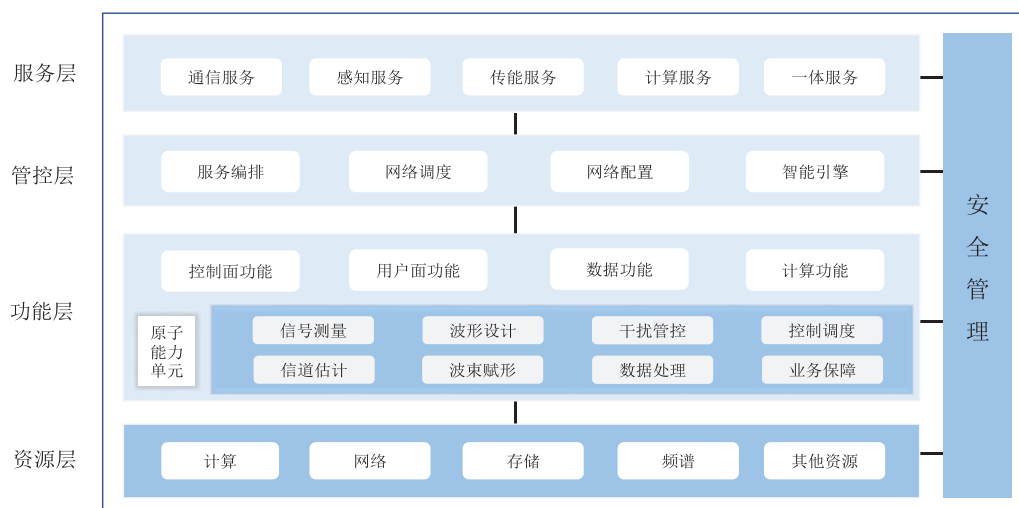


图1 6G通信感知计算一体化网络架构

备、数据存储设备和用于网络加速等业务功能加速的各类硬件加速设备或者异构融合设备,以及资源管理系统,包括虚拟资源和物理资源的管理,这些资源受管控层的编排和调度,为功能层提供资源保证。资源层物理设施实体分布在空天地海、云边端、广域局域等不同区域。

3.2 功能层

根据需求对资源层物理设施进行多维资源的互联、组织、协同、调度构建具备不同网络能力的业务逻辑;为管控层提供数据、计算和决策执行能力支撑。功能层由信令处理单元与用户转发、数据处理和计算处理单元组成,为网络和服务层提供接入控制、连接传输、数据采存、算力互联纳管和计算执行等业务服务能力支持。

针对通感算一体化的架构设计,可以根据各功能实体的特性,细化为原子能力单元,各原子能力单元通过对下层资源的调度,形成可供上层使用的一系列网络原子能力,主要包括:信号测量、信道估计、波形设计、波束赋形、干扰控制、数据处理、控制调度与业务保障等能力集。基于内生理念设计,原子能力单元集能够实现无线环境、空口资源、射频资源以及网络算力、路由转发、安全等要素资源的协同和融合调度,形成通感算一体化控制能力、感知数据转发、感知数据计算、数据安全等能力,以实现实时精准的网络控制、调度和运行,满足服务层不同业务的需求。

3.3 管控层

管控层接受服务层的请求,在对服务请求进行多维度智能分析的基础上,为服务和应用作出智能决策,并把抽象的网络策略转换为具体的可部署网络和最佳运行

环境,最终为应用层提供高效的服务以及互联互通能力。服务编排可将服务层的应用快速解析为单项服务能力和服务质量要求。网络调度可快速按需创建网络功能、网络路由等,动态调整网络各节点的算力、带宽、存储等资源占用,对网络进行弹性伸缩处理等。网络配置对网络功能组件进行各个层次的配置,使之符合应用层的需求,并对网络进行生命周期管理,监控网络的运营状态。

首先,全面分析服务层的需求特性,包括业务的性能、SLA、连续性服务等属性,结合应用场景、网络数据、资源数据、终端数据、业务体验数据、用户使用时间和空间维度、用户移动轨迹等,对具体业务的资源消耗、服务质量、用户体验、接入模式、部署模式和安全可靠性要求等进行实时与非实时分析后生成各类决策,包括服务编排、网络调度、网络配置等。其次,把抽象的网络策略转换为具体的可部署决策,最终为功能层高效的网络互联和算力互通提供支持。管控层同时对外提供控制接口、管理接口、状态查询接口等,为上层业务提供支撑。

3.4 服务层

服务层是6G网络对外的平台使能层,包括通信服务、感知服务、传能服务以及通感服务和通感算一体服务等,各种服务可以根据业务的差异,映射成相应的指标要求,包括(但不限于):1)性能要求:指同时满足用户访问的能力,如用户数、并发能力等;2)SLA要求:指服务提供的带宽、时延、丢包率、误码率、时延抖动等;3)时间能力:指提供服务的时间可用性;4)空间能力:指服务和应用空间可用范围,比如市区、边疆、远海等;5)业务连续性:指服务和应用满足客户在移动过程中的业务连续性需

求，比如在行驶的汽车、高铁、飞机上保持业务连续性。

4 6G通感算一体化网络关键技术

如图2所示，通感算一体化网络架构是集通信、感知、计算和应用为一体的系统架构。无线架构设计中，无线空口波形设计是一体化技术的核心之一，其目标是基于同一套射频收发设备和相同频谱同时实现无线电通信和雷达感知的功能。从组网考虑，针对不同业务需求可以采用多频段协同感知，实现覆盖能力、感知精度的提升；通过组网多节点间协同感知，解决单个节点感知的覆盖能力和精度的局限，提升感知性能；通过多模式感知方式的协同，实现全方位的感知全域框架，实现对周边环境的精细精确感知。

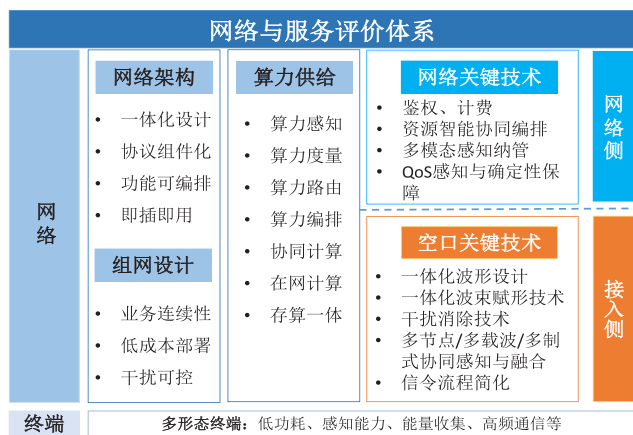


图2 6G通感算一体化网络关键技术

通感算一体化架构需要根据业务考虑网络资源和算力资源的分配，管控层根据服务层的业务需求和指标映射，进行业务编排，按需分配资源，形成网络配置要求，实现网络灵活互联和功能交互协作。基于网络功能层的逻辑分工，形成跨层的通感算融合设计和统一编排管理，并结合算力、网络等资源的实时状态合理分配计算任务，形成数据处理一体化、资源分配一体化和服务实现一体化的互惠共生架构。

4.1 无线空口关键技术

（1）通感算一体化信号波形设计

波形设计是通感算一体化基站空口关键技术的重要组成部分。空口波形设计目前主要有三个研究方向：侧重通信的一体化波形、侧重感知的一体化波形以及基于通感融合的一体化波形。其中，通信波形主要以 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用技术）波形为代表，感知波形主要以线性调频 LFM（Linear Frequency Modulation，线性调频）波形为

代表，而通感融合的波形主要以 OTFS（Orthogonal Time Frequency Space，正交时频空调制）波形为代表。

OFDM 波形：侧重通信的一体化波形通常是基于 OFDM 波形进行一定程度的改造，这样可与现有的无线通信基站硬件体系相互兼容。一种可能的改造方法是通过对物体反射回来的 OFDM 信号进行调制符号域信号处理，即分别对频域和时域进行 IFFT（Inverse Fast Fourier Transform，快速傅里叶逆变换）以及 FFT（Fast Fourier transform，快速傅里叶变换）运算，可以得到时延与多普勒信息，获得目标物体的距离和速度信息^[5]。另一种可能的改造方法是采用 OFDM 与雷达脉冲联合的波形设计：在 OFDM 相等频率间隔的子载波上插入雷达参考信号，根据脉冲雷达的原理，利用插入的雷达参考信号实现感知功能。这种联合的波形设计的特点是 OFDM 信号的一部分子载波被雷达信号所占用。

LFM 波形：侧重感知的一体化波形通常是基于 LFM 波形进行一定程度的通信改造，但一般仅能传递极低速率的通信信息。LFM 信号主要用于雷达感知系统中，通过将发射信号与回波信号进行混频，得到一个与目标物体距离直接相关的中频信号，经信号处理后可以得出目标物体的距离和速度的高精度信息。LFM 信号的设计初衷就是希望通过捕捉混频后中频信号的频率变化精准计算出目标物体距离和速度信息，但是对 LFM 信号波形的改造都会影响其感知性能。因此，目前基于 LFM 的一体化波形设计研究方向主要包括：一是在 LFM 波形中嵌入低速率的通信信息；二是利用雷达旁瓣波束等不影响时频域波形的方式来发送通信信息。

OTFS 波形：正交时频空调制 OTFS 使用二维傅里叶变换将数据由传统时频域变换到时延多普勒域，并利用传统 OFDM 调制解调系统进行处理。与上述波形不同之处在于，OTFS 波形携带了通信和感知信息，接收端通过计算可以获取无线信道的时延多普勒信息，并通过系统建模构建感知图像。基于该高分辨率的时延多普勒雷达图像，能同时获取信道中多个目标发射物的位置和速度信息。

OTFS 波形在实际应用中也存在一些不足尚待解决。首先 OTFS 系统的接收端必须完整接收包含多个 OFDM 符号的信号块之后才能进行二维傅里叶解调处理，因此会带来比 OFDM 系统更大的通信时延；其次由于 OTFS 信号的接收解调在时延多普勒域完成，其所需的计算资源更多，需要较强的计算硬件支持。

（2）多天线波束赋形技术

在雷达系统中，实现目标物体定位的三个关键参数

是:距离、速度和角度。其中,距离值通过发射信号与回波信号的时延差计算所得;目标物体的速度参数通过回波信号的多普勒频移计算所得;通过测量多天线反射回来的信号与发射出去的信号之间的相位差,可以计算出目标物体的角度。通过单天线即可粗略获取目标物体的距离和速度参数,但是只有通过多天线阵列,才能获得精确的数值,包括目标物体所在方位的角度参数。

实际上,MIMO(Multiple-Input Multiple-Output,多输入多输出)通信系统与相控阵雷达的基本原理及算法类似,都是基于天线阵列的波束赋形和分集增益原理。因此,移动通信系统的感知功能,通常借鉴雷达系统对目标物体的反射定位原理,利用无线电波实现对目标的定位、检测、成像和识别,只使用单个基站的信号源即可实现其覆盖范围内目标物体的定位检测等。通信感知计算一体化设计系统中,基于高效实时的计算能力,利用阵列天线波束赋形技术同步提升通信的传输速率和感知精度。通信系统中,波束始终指向目标终端,以保障稳定的通信质量;感知系统中,波束需要时变扫描,以实现更大范围内目标的估计和检测。对于单波束而言,通信功能需要更窄的波束宽带以集中功率效率,而感知功能通常需要波束宽度较宽以提升感知范围。由于通信和感知两大功能各自的侧重和需求不同,系统需要对两者进行权衡与协调。

4.2 网络化协同感知技术

(1) 多点组网协同感知技术

多节点协同:在通感算一体化系统中,单个基站节点的资源是有限的,可以通过多基站协作的方式来提升通信和感知服务质量。一般有两种协作模式:多基站联合感知和宏微基站协同感知。多基站联合感知是一种通感算一体化信号波形层面的多节点协同技术。在多基站联合感知系统中,两个基站节点可以分别作为信号波形的发送端和接收端。信号由一个节点发出,经过目标物体的反射,回波信号由另一个节点接收,这种模式可以避免由同一个节点独自收发信号时因全双工模式产生的自干扰。宏微基站协同感知是一种无线资源和算力资源层面的多节点协同技术。由于通感算一体化信号波形在进行感知时无法穿越大型障碍物如墙壁,因此宏基站无法感知建筑物内的目标物体。通过将微基站部署在建筑物内,和宏基站同时感知,两者的感知数据可以在汇聚点进行联合计算,实现室内外无死角的感知能力全覆盖。

多频点协同:当前的移动通信系统主要使用 Sub 6 GHz

频段,未来可以向毫米波、太赫兹和可见光等更高频段发展,同时更高的频段有更大的可使用带宽,也给通信和感知融合提供了条件。不同的电磁波频率有不同的传播特性,适用不同的业务场景,通感算一体化设计在提供不同业务服务的同时,需要部署支持不同频点的硬件设备,以满足通信感知等性能指标要求。电磁波的频率越高,在介质中的传输衰减越大,可用带宽资源越大。对于通信功能来讲,更大的带宽可以获得更高的通信速率;同样,对于感知功能来讲,带宽越大,距离速度分辨率、距离速度测量精度等感知性能也越高。也就是说,不同业务对于传输频段的选择,就是在信号传输损耗和通信感知性能之间做出取舍,满足各项指标要求。例如,低频信号适用于远距离、低速率通信和模糊感知,而高频段信号适用于近距离、高速率通信和近距离精确感知。此外,信号频率越高,衍射能力越差,对于需要跨越障碍物的通信与感知场景,需要频率较低的传输方式。

多模式协同:通感算一体化波形可以通过发射信号与接收信号的相关运算,准确感知信道环境中所存在的反射物、障碍物以及各自的距离和终端移动速度等信息。根据感知信号的发射与接收方式的不同,可以将感知模式分为如下六种:基站自发自收(基站自发感知信号自收反射信号)、终端自发自收(终端自发感知信号自收反射信号)、基站间协作(一个基站发感知信号另一个基站收反射信号)、基站发终端收(基站发感知信号终端收反射信号)、终端发基站收(终端发感知信号基站收反射信号)、终端间协作(一个终端发感知信号另一个终端收反射信号)。当通感算一体化网络需要服务不同的融合业务时,可以采用多个感知模式协同处理的方式,以获得更优的服务能力。

(2) 多模态协同感知技术

为满足日益复杂的感知需求,未来的感知任务将不再局限于基于移动网络的感知增强,还需考虑移动网络和非3GPP(3rd Generation Partnership Project,第三代合作伙伴项目计划)无线网络(如Wi-Fi、蓝牙等)协同感知。通过几种不同模态的协同感知,提升通信体验,强化感知精度,提高算力资源的利用率。移动网络和非3GPP无线网络协同感知可充分发挥移动网络和非3GPP网络各自的优势,以服务于未来更多样更复杂更高精的通感算场景。因此在6G网络架构中,需要同时考虑多种模态的统一接入、感知数据的汇聚以及感知数据综合分析处理。例如可以吸收3GPP和Non-3GPP统一接入5G核心网的经验,实现感知业务的深度无缝融合。

此外, 6G也可以与其他传感器协同感知, 如温度、声音、振动、压力、图像、触觉、运动或污染物等多种不同模态的感知能力, 多模态协同感知可将多种感知能力进行融合, 对多模态感知知识进行归纳融合、联合演绎, 从而实现如复杂情感计算、音频匹配人脸建模等以往单模态难以实现的复杂场景, 提升多感官感知水平。关键技术包括解决数据格式、时空对齐、噪声干扰等带来的多模态数据的差异问题以及多模态数据的融合问题。传统的融合方式包括串行融合、并行融合和加权融合等, 后续也需考虑基于AI学习的融合方式挖掘多模态数据间的关系。

4.3 计算服务关键技术

未来感知系统将产生海量的原始数据, 如此多的数据全部上云集中计算可能导致网络拥塞和计算延迟, 6G实现云边端多级算力互联和协同, 并实时感知算力状态信息, 通过将数据通信、多模态信息感知、信息处理与分布式计算等技术深度融合, 实现计算服务的按需调度和高效共享。

(1) 计算资源状态感知

6G网络基于云原生技术, 支持计算和网络的融合, 实现算网一体, 能够准备感知业务需求、网络资源和算力资源状态, 为业务和数据提供最优路由和算力。算网资源的感知主要通过采集、探测、分布式路由上报、应用层上报等多种方式获取算力节点、网络设备、存储设备等设施的状态信息, 构建计算资源状态信息库, 为管控层的计算任务调度、算力节点选择、网络路径规划等提供最新的状态信息。

计算资源状态感知主要包括算力资源感知、网络资源感知和计算服务的感知。其中, 算力资源感知主要对泛在分布的异构算力资源的感知, 包括CPU (Central Processing Unit, 中央处理器)、GPU (Graphics Processing Unit, 图形处理器)、内存等算力资源负载状态的实时感知; 网络资源感知主要是对网络带宽、时延、路由信息、感知能力等网络状态信息的感知; 计算服务感知主要是对部署在算力节点的各类服务及应用进行感知。通过计算资源状态的感知和聚合, 构建了统一的算网一体的全局拓扑视图, 支持一体化的算网编排。由于算力资源的泛在分布, 为了满足不同业务 (通信、感知、计算、融合业务等) 的多样化性能要求, 以及用户位置所在网络的带宽、时延等要素, 算力节点的位置、容量、成本等多要素, 需要进行算网资源的联合优化和精准规划, 按需动态生成资源调度策略和路由方案。

(2) 计算任务协同调度

6G实现算网一体, 构建云、边、端三级算力架构, 网

络可以根据感知计算任务的需求, 并结合算力、网络等资源的实时状态合理分配计算任务, 实现云、边、端计算协同。

边缘计算节点的计算资源往往是有限的, 而且计算能力通常各不相同, 同时, 边缘计算节点的计算负载状况是动态变化的, 因此需要根据业务特点、网络、终端能力及运行环境等, 灵活地协同调度计算到不同的计算节点进行处理, 合理分配计算任务。网络的分布式算力资源在众多的分散位置, 需要借助于算力感知、算力路由等技术发现并调用相应的资源, 实现对分布式算力的统一管控, 并根据业务的计算任务需求, 实现高效统一的资源编排和调度。

6G网络具有内生算力, 可以将部分计算任务从主机侧迁移至网络层, 利用FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列)、智能网卡和可编程ASIC (Application Specific Integrated Circuit, 专用集成电路) 网络硬件实现报文处理完成计算加速, 降低网络时延。为了更好地实现在网计算能力, 需要将网络中的通用算力、专用算力等各种异构算力资源纳入统筹考虑, 提供计算、加速和存储等多种资源的共享和灵活扩展, 实现感知数据的随路计算; 同时采用确定性计算、实时性优化等技术, 达到感知系统对算法、计算密度和实时性等方面的要求。

4.4 融合服务编排

随着6G网络业务边界的拓展, 将实现通信与感知、计算的深度融合, 业务实现除了网络连接之外, 可能包括计算、数据、算法等多要素, 基于不同的任务要求对这些要素进行统一的编排管理和配置。首先, 管控层接收到来自服务层的业务需求, 并基于功能库对业务意图进行分析, 通过意图识别转成网络可识别的任务需求 (如网络连接服务、数据服务、算力服务等), 业务编排功能通过对各类资源和业务能力的智能编排实现业务需求, 具体包括:

(1) 按需编排各类网络功能和网络资源, 形成特性的功能组合, 包括控制面功能, 用户面功能, 数据功能, 计算功能以及具体算法等。

(2) 为保证业务QoS, 对该业务所涉及的功能进行相应的资源需求评估, 即确认各个功能所需求的算力/网络/数据/算法资源等, 以及确定各个功能执行所需的模版、镜像、脚本等预置信息。

(3) 基于当前算力/连接/数据/算法资源等状态信息, 将为实现该业务所需的功能组合进行智能编排, 规划合适的业务执行流程, 作为网络运行的出入信息。

控制面功能和用户面功能的编排可以形成网络连接

服务,包括面向终端用户和行业用户的基本连接,也包括面向6G系统内计算、数据等服务能力所需的连接服务。数据功能编排通过对数据服务质量的解析分析,可以细化数据任务,包括预处理、分析、存储等,以及处理数据所需要的计算资源、算法资源、连接资源等其他要素能力的支持,同时将数据服务质量分解为不同任务的服务质量。计算功能编排实现计算服务能力,分析算力服务质量,然后细化为不同的计算任务,包括算力资源需求(CPU、GPU、DPU(Data Processing Unit, 数据处理器)等)、存储需求等不同任务,以及数据资源、算法资源、连接资源等任务要求,并完成对计算相关任务的编排和资源映射。

4.5 网络协同调度

网络资源的调度是实现通感算融合的基础,保障通感算业务在网络中高效运行,同时注重数据的隐私安全,支持分布式推理学习,可以充分利用云、边缘、终端的数据和计算资源,并能兼顾网络效率和绿色节能。动态性和多样性是网络调度面临的主要技术挑战,分别体现在算力环境和智能业务两个维度上。例如,信道变化导致的算力节点间传输链路的动态性,终端移动导致的算力网络拓扑的动态性;通感智能业务触发在时间空间分布上的动态性以及数据连接的通信制式存在多样性,多种不同的通感算模型的训练和推理等。

网络调度将基于用户对网络服务的定制化需求以及服务编排所导出的服务执行网络功能(动态)调度等功能,具体包括:

(1) 根据用户和业务的定制需求,动态调整底层资源满足通信、感知和计算业务的性能要求,并基于用户的实时接入位置,可以动态地提供网络接入服务。

(2) 基于服务编排的服务调度策略执行对应功能/服务,各执行体之间进行必要的交互,同时,在执行过程中进行状态监测。

(3) 网络调度通过与智能引擎的交互,基于用户位置的变化、网络状态的变化,以任务为对象(包含控制面功能、用户面功能、计算功能、数据功能等),动态、实时、联合调整网络的部署和运行策略,为用户提供高质量的网络服务。

在业务执行过程中,网络调度通过智能引擎获取网络服务状态的数据分析与预测结果。如用户面的感知数据转发流量与网络QoS保障预测、网络资源的负载能力预测、计算节点的符合实时监测等。根据相关信息,网络调度可以提前调整网络中的相关功能服务策略,实现

灵活地扩缩容能力,提升网络服务质量。同时,基于用户的位置变化,网络调度可以实时地向智能引擎提供用户的位置信息,对用户的移动轨迹进行预测,基于结果为用户提前部署邻近的网络服务,预先保证算力和数据的准备就绪,实现低延时的高效服务效果。

4.6 安全关键技术

(1) 6G 区块链技术

区块链技术是一种构建去中心化信任的关键技术之一,去中心化信任基于共识机制构建的新型多边互信体系,该体系将信任的锚点从传统的权威机构转化为多边共识的群体意志,通过依赖底层的密码学技术,构建安全可信的分布式数据处理、存储、溯源的基础设施。6G通感算一体的网络具备跨信任域、跨运营商、跨设备商等特点,生态各方深度参与,非局限于单个运营商内部的去中心化,因此,6G通感算一体网络需要具备一个可以支持多方互信的机制和平台。采用区块链技术可以满足6G新的安全需求,为构建6G通感算体系的信任建立提供新的思路和更多的可能性。

基于区块链的感知数据权限管理:未来通感算一体化网络将拥有超海量的感知端点,数据的来源和特征都具有多样性特点,且由于高精度的定位和感知业务将会获取到大量来自个体或者组织的数据,需要遵循GDPR(General Data Protection Regulation, 通用数据保护条例)等对个人数据权限保护的法律,期间数据的权限管理将会变得更加广泛而复杂,需要更加自动化和智能化的执行数据的授权、让渡、使用管理。

同时,通感算一体化的网络将会大量使用到网络设备感知的数据,数据的真实性和安全性对6G网络系统的安全至关重要,基于区块链的感知数据存证审计,通过定期保存数据快照、关键信息等方式,形成可追溯追责的数据存证管理方式。

(2) 隐私保护技术

6G通感算一体网络的隐私保护技术主要包括安全多方计算和同态加密等技术。利用安全多方计算等隐私保护分布式计算技术,可在保证多个参与方获得正确计算结果的同时,无法获得计算结果之外的任何信息,从而保证各方数据的安全性和私密性。利用同态加密等密码学技术,可在数据使用过程中隐藏用户隐私信息,实现用户凭证信息的自主控制。通过设计不同隐私级别的凭证颁发和校验方法,6G通感算一体网络将提供用户自适应可组合的隐私保护方案,实现用户信息“可用而不可见”,有效避免敏

感信息泄露。

此外，6G通感算一体网络将结合AI技术对隐私数据进行保护。得益于AI技术带来的节点智能的能力，针对6G通感算一体网络设计轻量级和分布式的安全机制，有效确保用户身份验证和访问控制；设计新颖安全路由方案和信任网络拓扑结构，以解决网络中可信节点与恶意节点共存时信息交互的泄露风险；引入联邦学习技术，实现在不共享原始数据资源的情况下，借助6G通感算一体网络多个节点的数据进行联合建模，减少数据传递，保护数据隐私和数据安全。

4.7 网络与服务性能指标体系

6G通感算一体化服务在不同的应用场景对服务的类型和质量有不同的需求，因此需要设计分级的网络与服务性能指标体系表达差异化的服务需求和效果。在传统通信的性能指标之外，引入感知资源、数据资源、存储资源、异构算力资源、算法资源等感知和计算元素，综合评价6G通感算一体化服务和网络质量。此外，随着 society 对绿色低碳、数据安全的关注不断增强，安全、隐私和资源开销也需要纳入6G网络和服务质量评估维度。因此，6G通感算一体化服务性能指标需要在性能、可用性、安全性等多个方面达到预期水平。

在功能层的原子能力单元中，6G通感算一体化网络与服务性能指标包括误码率、时间同步精度、编码调制效率、采样频率、模型训练开销、模型推理开销、能耗开销、信令开销、数据处理时效、数据安全等级、数据隐私等级、数据存储占用等多方面指标。原子单元的性能指标表征了6G网络的基础能力。6G通感算一体化系统的性能指标如表1所示。其中，感知精度可表示为一定置信度下不同感知业务的感知精度，如距离精度、速度精度、角度精度、成像精度等；感知分辨率是区分多个感知目标的能力，如距离分辨率、速度分辨率、角度分辨率、成像分辨率等；峰值算力是单个设备可获得的最大算力。这些网络功能层的性能指标表征6G网络承载某项服务功能的能力与完成质量。

表1 6G通信感知计算一体化各功能的性能指标

服务功能	通信	感知	计算
性能指标	峰值速率	感知精度	峰值算力
	通信时延	感知分辨率	计算时延
	移动性	感知范围	单次计算能耗
	时间精度	感知时延	单次计算成本
	可靠性	感知更新频率	-
	单位比特能耗	单次感知能耗	-
	单位比特成本	单次感知成本	-
		安全和隐私	

5 结束语

通感算一体化网络同时具备感知功能、通信功能与计算功能。通过通感算软硬件资源的协同与共享，实现多维感知、协作通信、智能计算功能的深度融合和互惠增强，从而能够承载沉浸式XR、全息远程呈现、交互式3D虚拟数字人、协作机器人、无人驾驶等多样化的业务，实现未来社会的万物智联。

参考文献：

- [1] ITU-R. SWG IMT-2030, draft new RECOMMENDATION ITU-R M.[IMT.FRAMEWORK FOR 2030 and Beyond], Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. 2023.
- [2] IMT-2030(6G 推进组). 6G 典型场景和关键能力白皮书 [R]. 2022.
- [3] IMT-2030(6G 推进组). 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021.
- [4] IMT-2030(6G 推进组). 通信感知一体化技术研究报告 [R]. 2022.
- [5] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告 [R]. 2023.
- [6] 姜大洁, 袁雁南, 周通, 等. 面向 6G 的通感算融合服务、系统架构与关键技术 [J]. 移动通信, 2023,47(3): 2-13.
- [7] 田梦秋, 惠一龙, 承楠, 等. 6G 通感算资源按需调配: 一种基于场景识别的架构 [J]. 移动通信, 2023,47(3): 14-18.
- [8] 郭贺铨. “商用四年再出发, 融合创新开新篇” 主题演讲 [Z]. 2023.
- [9] 郭贺铨. “数字经济新时代, 通信技术新热点” 主题演讲 [Z]. 2023.
- [10] ITU-R. preliminary draft new Report ITU-R M.[IMT.FUTURE TECHNOLOGY TRENDS OF TERRESTRIAL IMT SYSTEMS TOWARDS 2030 AND BEYOND][R]. 2022.
- [11] Hadani R, Monk A. OTFS: A New Generation of Modulation Addressing the Challenges of 5G[R]. 2018.
- [12] 中国联通. 6G 中国联通 6G 网络体系架构白皮书 [R]. 2023.
- [13] 中国联通. 中国联通算力网络架构与技术体系白皮书 [R]. 2020.
- [14] 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(3): 14-18. ★

作者简介



王友祥：高级工程师，博士，现任职于中国联合网络通信有限公司研究院，主要研究方向为5G/6G、工业算网等。



裴郁杉：正高级工程师，博士，现任职于中国联合网络通信有限公司研究院，主要研究方向为通信感知计算一体化、5G+工业互联网。



黄蓉：正高级工程师，博士，现任职于中国联合网络通信有限公司研究院，主要从事移动通信网络架构和关键技术研究、标准化以及部署应用工作。