



专题：5G 演进技术

通感算智一体化技术发展模式

段向阳^{1,2}, 杨立^{1,2}, 夏树强^{1,2}, 韩志强^{1,2}, 谢峰^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518057)

摘要: 面向 5G-Advanced 演进系统和未来 6G 新系统, 与通感算智相关的新功能、新业务被不断地开发拓展并融入系统中。阐述了在 5G-Advanced 和 6G 不同阶段, 通感算智一体化技术场景用例和未来技术模式功能的需求预期, 从中提炼出其技术五大发展模式特征, 并以此指导未来 5G-Advanced 系统开发和 6G 新系统的标准化开展, 使通感算智一体化技术能得到有效的落地应用和未来商业价值最大化彰显。

关键词: 5G 演进; 6G; 通感算智一体化; 技术发展模式

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022039

Technology development mode of communication/sensing/ computing/intelligence integration

DUAN Xiangyang^{1,2}, YANG Li^{1,2}, XIA Shuqiang^{1,2}, HAN Zhiqiang^{1,2}, XIE Feng^{1,2}

1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China

2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia, Shenzhen 518057, China

Abstract: Various new functions and services related to communication/sensing/computing/intelligence have been targeted, developed and fused into the existing 5G-Advanced and emerging 6G new system. The technical scenarios and use cases of communication/sensing/computing/intelligence integration and its expectation for technique mode requirement in 5G-Advanced and 6G different phases were addressed, meanwhile five characteristics of its technology development mode were extracted. The proposed viewpoints may guide the research and development of 5G-Advanced system and standardization process of 6G new system in future, leading to more effective and profitable applications and maximization of business value from communication/sensing/computing/intelligence integration.

Key words: 5G-Advanced, 6G, communication/sensing/computing/intelligence integration, technology development mode

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200)



0 引言

随着 2021 年年底“第三代合作伙伴项目”全会（3GPP RAN）正式通过一系列 Release 18（Rel-18）的新标准立项，5G 移动系统的标准化正式进入“下半场”，即 5G-Advanced（以下简称“5G-A”）阶段。5G-A 基于 5GS（5th generation system）现有的架构功能体系进行平滑的演进拓展，旨在更高效地支持 toC/toB 不同行业领域新场景下的丰富新用例，如 FR2 频段内无线覆盖增强、大上行数据传输、超低时延且大带宽传输、超高精度定位等^[1-2]。在 5G-A 阶段之前，3GPP 传统电信系统除了不断提供高质量的通信业务外，其实在“网络感知技术”（如已开发各种定位功能：“最小化路测/业务体验”测量评估等）、“网络计算技术”（如已应用基带资源虚拟化、多接入边缘计算（multi-access edge computing, MEC）等）、“网络智能技术”（如已基于机器学习的网络智能化、网络数据分析功能（network data analytics function, NWDAF）等）方面，都已有较成熟的标准化和产品化成果示范，因此，ODICT（operation/data/information/communication technology）产业界普遍坚信：“感知 S”“计算 C”“智能 I”仍将会是未来 5G-A 和 6G 新系统的重要技术组成和系统自身赋能、提质、增效之利器抓手，从而孕育和繁衍出了所谓“通感算智一体化”的构想，即未来移动系统中的各个网元节点能够尽量地集成各种“通信”“感知”“计算”“智能”功能，内部统一协同、优化、利用好“通感算智”相关的资源和信息，且对外更高效、优质地联合提供“通感算智”类业务服务（注：“业务”通常指移动系统直接提供给终端用户的完整服务；“服务”通常指移动系统提供给第三方的局部能力服务）。由于 5G-A 系统既成架构功能体系和工作范式的约束（为了确保维

护产业各方的既有利益和格局），“通感算智一体化”构想在 5G-A 阶段，更多以“外挂”和“打补丁”的方式逐步逐级地集成融合于 5G-A 系统内；由于未来 6G 新系统设计尚未成形，产业界更期待“通感算智一体化”能以“原生/内生”的方式，更深度地内嵌、融合于 6G 新系统^[3-4]，甚至刺激促进带来更繁荣多元化的 6G 新业态。

“通信”“感知”“计算”“智能”各个技术领域自身就包罗万象，因此“通感算智一体化”其实是一个非常宏大的技术概念体系和多模态系统范式，其具体内涵和外延在当前产业界还没有统一、确切的规范定义描述，从而造成产业界不同方出现分歧，造成差异化的解读和推广。过去多年，学术界已分别从“通感”“通算”“通智”一体化和融合的各自子维度方面，进行了大量的理论和应用模型研究^[5-8]。相比之下，工业界（特别是 3GPP 电信生态）在这方面更偏向于技术谨慎研判，更多关注上述概念技术的可行性、实际应用前景和可营利商业模式等问题，因此工业界更多考虑“通感算智一体化”可商用场景用例的规模、功能/效果/性能/成本的挑战、业态有利/不利的竞合因素、产业多方利益平衡协同发展等问题，而这些关键问题之前在学术界没有系统性地被深入研究评估和建议。因此，在如今 5G-A 向未来 6G 的演进发展之路上，深入地分析探究“通感算智一体化”在不同阶段的功能技术模式研发重点、商业用例应用形态和未来技术发展模式特征等，非常具有产业实际价值和指导意义。具体而言，在未来 ODICT 产业短、中、长期的不同阶段，面向“通感算智一体化”大趋势，工业界会先做哪方面技术模式，哪些技术用例和特征功能更易于先期被导入验证和在商用层面探路，产业参与方更适合做哪方面的一体化融合应用等。

1 通感算智一体化系统架构抽象和综述

1.1 5G-A 系统和 6G 新系统的通感算智一体化架构抽象

5G 移动网络主要由基于服务化原则的核心网 SBA-5GC 和非服务化（传统“烟囱式”协议栈范式）的无线接入网 NG-RAN 组成^[9-10]。5G-A 系统基于 5G 基本架构和功能范式，继续实现更多功能的增强拓展，例如，在 5GS 体系框架内尝试定义、引入与感知、计算、智能相关的新功能或新逻辑实体。未来 6G 新系统的架构和功能范式还在研究中，尚未确定，但产业界主流研究已指出其主要的愿景特征，例如，6G 新系统需要支持原生内生智能^[11]、通感一体化融合^[12]和系统基于组件化/服务化原则从而获得更好的柔性、弹性和韧性特征^[3]等。5G-A/6G 系统架构涉及很多技术细节（具体网元、不同接口流程、复杂协议栈等），它们会影响后续通感算智一体化系统产品的开发实现，但和本文所要重点探讨的技术发展模式弱相关，因此，有必要先做通感算智一体化系统的架构抽象简化，以突出反映其强相关核心点。考虑

电信业已广泛流行的核心网侧云化、云网/算网融合、部分功能边缘化下沉和无线接入网侧功能愈发分离等技术发展趋势，以及未来各种强/中/弱终端能够自主地在本地灵活组网的需求，5G-A/6G 系统架构都可由如图 1 所示的通感算智一体化系统架构抽象统一抽象简化表达，自上而下分别对应“核心网域”（至少包含“感知云”“通信云”“智能云”）、“网络边缘域”、“无线接入网域”、“空口边缘子网域”和“终端域”，而“计算功能”作为底层硬件基础虚拟化资源，灵活地支撑、服务于通信、感知、智能等业务功能。

1.2 通感算智一体化系统架构抽象说明和“广义/狭义一体化”的差异

过去，传统的通信网元节点或服务器更多地偏向于单一的业务功能和服务。图 1 中未来 5G-A/6G 系统中的核心网、无线接入网和终端，都将更多地一体化集成和深度融合通感算智资源和能力。因此，5G-A/6G 网络预期将是移动通信网络、无线感知网络和泛在算力网络的有机融合体。它在内部实现通信、感知、计算、智能各功能彼此之间的深度支撑互助互惠，从而系统综合性能被良性地循环、促进、

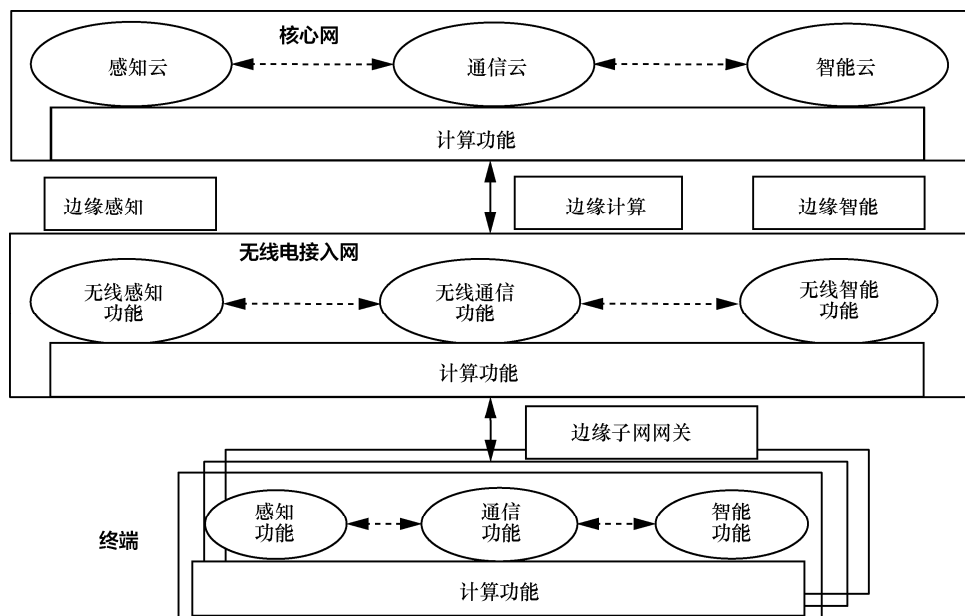


图 1 通感算智一体化系统架构抽象



提升；它对外可实现通信、感知、计算、智能服务的按需定制化，且有服务质量（quality of service, QoS）保障的联合提供。

为了简化说明，本文暂且聚焦于图 1 中“感知”能力服务，它可以存在和实现于核心网、边缘、无线电接入网和终端中的任何一个层级内。不同层级内的感知功能可面向相同、相关或不同的感知类型任务，分别做“信号级”“数据级”“特征级”“内容级”的关联处理和联合利用，且它们对各个感知技术的功能性能要求也不同。“广义通感一体化”应用已久，其内涵丰富、包罗万象，例如，终端拍照摄像数据上传、无线传感器数据采集上传、基站射频探测测量数据上传、核心网和网管针对收集到的各种类型感知数据进行汇聚处理等。上述这些仍然是未来 5G-A/6G 系统中常见的感知类操作，但它们和通信功能基本解耦保持逻辑独立，更多体现了感知和通信彼此之间的协作关系。上述“广义通感一体化”用例，并不需要系统在硬件架构或协议逻辑层面深度地融合或紧耦合，仅需要实现“物理集成一体化”，以共同支撑完成上层的业务应用。相比而言，“狭义通感一体化”旨在利用相同的硬件资源平台，基于收发的无线通信电磁信号，实现某种感知类任务目的，例如，对象存在与否的探测、定位测速、分类识别、细节成像等，这些感知用例和通信功能之间并非独立解耦，需要系统在硬件架构和协议逻辑层面深度地融合和紧耦合，实现“业务逻辑一体化”。“狭义通感一体化”旨在追求“通信”和“感知”在资源（“系统硬件”“系统软件”“频谱功率”）、功能（“管理”“编排”“评估”“控制”“调度”“执行”等）和信息（“业务/应用”“用户/目标感知”“系统感知”等）三大维度方面的深度融合共享，因此，该需求主要来自技术效能增益面和未来无线产品发展期望。另外，从时间发展的维度看，随着通感算智技术手段的不断进步，“广义/狭义通感一体化”各自

都将长期存在，服务于相同或不同的应用场景，从“初级”向“高级”不断地演进增强。

“广义/狭义通感一体化”的应用差异和各自演进示意图如图 2 所示，内圈的“狭义通感一体化”应用（也简称为“无线通感融合”）涉及的关键技术更多，且面临产品实现效果和性能更大的挑战，而外圈的“广义通感一体化”偏向多元技术手段的组合应用。同理，对于图 1 中的“计算”“智能”能力如何和通信一体化，它们同样存在类似“广义”和“狭义”的差别，其中，“狭义通算/通智一体化”旨在基于公共共享的物理逻辑资源进行统一联合的业务流程操作，它也需要系统在硬件架构和协议逻辑层面深度地融合和紧耦合，实现“业务逻辑一体化”，该需求主要来自技术效能增益面和未来无线产品发展期望。总之，无论“广义通感/通算/通智一体化”中的哪一种，其共同特点都是资源和业务流程的彼此独立解耦，系统中的无线、射频、计算等资源并未被联合地共享复用和最优化使用，感算智功能更多是通过“外挂/打补丁/松耦合”的方式物理集成到系统中。通感/通算/通智一体化“广义和狭义”“初级和高级”特性对比见表 1。

2 基于 5G-A 的通感算智一体化技术发展模式

2.1 5G-A 应用场景和用例

早期的移动通信系统，工作重点在于提升系统容量、改善无线覆盖和增强空口吞吐率速率方面。随着后续移动应用不断升级，系统业务响应时延、端到端传输时延和连接鲁棒性、确定性逐渐成为系统增强更重要的方面^[13]。在这样的需求背景下，通感/通算/通智一体化技术有了更大的用武之地。例如，在 5G-A 系统中，以基于 NR 信号做高精度定位为代表的通感一体化技术^[14-15]，可进一步开拓上层应用空间和优化系统性能；以 MEC 为代表的通算一体化技术^[16-17]，可进一步支撑低时延应用且降低数据传输开销；以基于核心

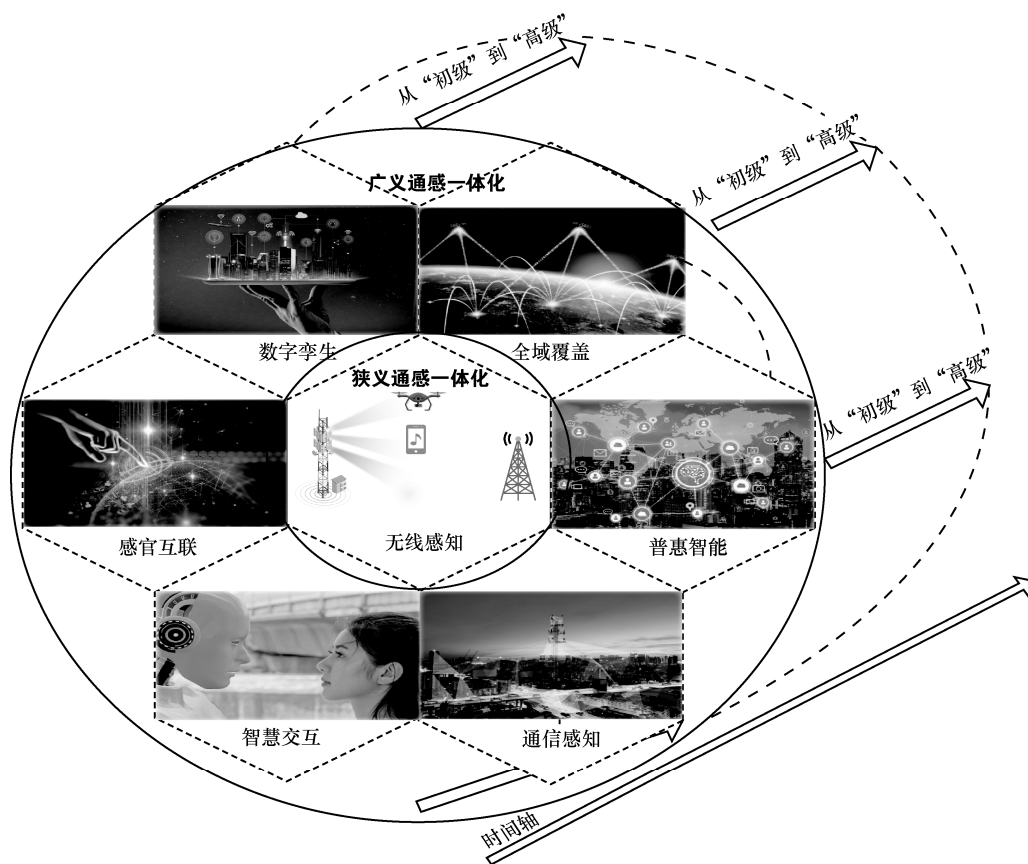


图2 “广义/狭义通感一体化”的应用差异和各自演进示意图

表1 通感/通算/通智一体化“广义和狭义”“初级和高级”特性对比

通感/通算/通智	频谱	波形	功率	射频	基带	算力	存储	数据（流）
广义一体化（共存，协作）	独立	不同	独立	独立	专有	专有	专有	无差分
狭义一体化（内嵌，融合）	共享	融合	复用	共享	共享	共享	共享	有差分
初级一体化	低效	传统	闲置	单一	低效	低效	低效	透明
高级一体化	高效	新型	充分	多元	高效	高效	高效	可解析

网 NWDAF 为代表的通智一体化技术^[18-19]，可进一步利用机器学习等手段优化系统策略和资源配置的精准度。因此，“通感/通算/通智一体化”技术其实已在 5G-A 系统中有较多应用，但这些应用旨在增强 5G-A 网络系统自身通信方面的性能和支撑、优化通信类业务，并没有对外部第三方用户（如来自互联网厂商或垂直行业客户）提供丰富的感知类、计算类和智能类的新业务、新服务，另外，通感、通算、通智三者之间也彼此相

对独立地存在发展和产业割裂。

2.2 5G-A 通感算智一体化技术发展模式

下面分析和总结通感/通算/通智一体化技术在 5G-A 系统中的五大技术发展模式特征。

（1）从“二位一体”逐步趋向“四位一体”

随着 5G-A 系统迈向支持更广阔的 toB 垂直行业领域，它将面临更复杂多变且异构组网的用户环境和数字多维空间，例如，各种多智能体终端、多方高精度同步协作、特殊的工业厂房环境、本地数



据隐私保护等^[20]。这要求 5G-A 终端和 5G-A 网络都具备更强的环境感知、计算和智能能力。5G-A 终端和网络都需要能通过各自的各种感知手段，尽早地获得物理、数字、业务环境的先验信息，从而尽早地优化自身的工作策略和资源预分配。但仅仅简单地对各种环境感知还不够，5G-A 终端和网络还要能借助本地或边缘强大计算能力和 AI 深度强化学习等手段，更高效、更精准地识别、推理、预测物理数字业务环境的未来变化趋势和潜在安全风险。通过各种感知组合手段运用所带来的大数据驱动，5G-A 系统在算力资源策略编排、智能算法模型参数等方面，亦可获得较大的性能改善和优化。因此对于 5G-A 终端或 5G-A 网络，通感/通算/通智一体化技术三者之间有着天然强相关性，三者之间能够更紧密地协作互助互惠，因此，未来 5G-A 演进更会趋向于通感算智一体化^[21]，通感/通算/通智一体化趋向于通感算智一体化示意图如图 3 所示。

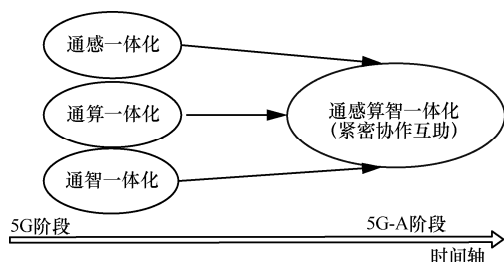


图 3 通感/通算/通智一体化趋向于通感算智一体化示意图

在 5G-A 早期阶段，产业界倾向于先从基本的通感/通算/通智一体化各自子维度出发，重点解决各自领域内的关键技术和问题挑战，例如，面向通感一体化的通感联合操作性能边界、通感一体化融合等级和指标体系、通感一体化波形、通感联合硬件设计，以及多维信号处理等。

(2) 网络侧通感算智赋能占优，终端侧赋能紧跟补充

5G-A 网络和 5G-A 终端各自都在研究着如何实现通感算智一体化功能。面对不同类型的通感算智类任务目的，其中某些任务让网络侧承担执行更适合，而某些让终端侧承担更适合，某些任务让网络和终端两侧“旗鼓相当”都能胜任或让两侧配合协作地共同执行。网络侧和终端侧在通感/通算/通智一体化方面的各自优势见表 2，反之网络侧和终端侧自己的优势方面可能就是对方的劣势，优势决定了场景用例的匹配适合度。总体而言，网络侧执行通感算智类任务，更有利于移动运营商未来直接开展和提供通感算智类新业务、新服务，因此，当前“网络侧通感算智赋能”在产业界的呼声更高且更占优。相比之下，终端侧执行通感算智类任务，更有利于丰富用户功能和提升用户体验，虽然这方面也很重要，但移动运营商不易直接掌控和抓到新盈利点，甚至某些终端通感算智类操作会冲击移动运营商的利益，因此，当前“终端侧通感算智赋能”在产业界的研究应用紧跟网络侧的赋能，处在为网络侧补充的局面。

再以通感为例，5G-A 蜂窝网络侧支持通感一体化有下面几点明显优势。

- 可基于多制式/多频段的无线信号进行全天候、大范围、无死角的联合感知。
- 多个无线基站站点可协作联合感知，以提升感知综合性能。
- 可利用更大规模的多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 多天线阵列获得性能增益。

表 2 网络侧和终端侧在通感/通算/通智一体化方面的各自优势

	通感一体化	通算一体化	通智一体化
网络侧	覆盖大、带宽大、基带强、多目标	资源多、算力强、易调用、易协同	模型算法丰富、数据样本多
终端侧	功耗小、成本低、用户应用灵活	低时延、用户使用灵活	数据隐私性好、模型算法个性化

- 网络侧可提供大样本数据库/丰富算力智能资源,提升对感知信号数据的处理和模式识别能力。

中国 IMT-2020(5G)推进组已制定了在 5G-A 系统中测试验证通感一体化技术用例的计划^[22],5G-A 阶段的潜在用例有实现毫米波通感一体化基站、无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)飞控系统、蜂窝车联网演示系统、大规模 MIMO 通感一体化系统、无人车(automatic guided vehicle, AGV)演示系统等。通过上述重点用例可看出,蜂窝网络侧的通感一体化技术和方案应用,主导了未来短中期的重点商业应用验证和推广。

(3) 5G-A 系统只能“尽力而为”去做

5G 移动系统当初并没有原生地考虑与感知、计算、智能功能的联合设计,因此,受限后向兼容性,5G-A 系统架构只能采用以 MEC 和 NWDAF 为代表的与“外挂式”计算智能相结合的方式,对系统内提供算智类服务。5G 系统的算力和智能资源主要部署沉积在网络云端和边缘端,因此数据处理的本地化、超低时延响应程度还不够。此外,基站群和终端群中的大量算力、智能、数据资源并未被最大化地汇聚和利用,会造成 5G 系统内资源的利用率损失和传输资源损耗。由于“狭义通智一体化”侧重在系统(包括终端),本身就能自构建成一个巨大的“分布式 AI 系统”,全面且深度利用网络内泛在的算力、算法、数据资源,并不断实现系统自身 AI 能力演进和按需提供 AI 服务保障。从这个角度看,当前 5G-A 系统还不太具备“狭义通智一体化”的上述特征。再进一步以通感为例,由于 5G-A 系统仍然工作在 sub-6 GHz 中低频段和 sub-100 GHz 毫米波频段,可用的无线带宽较窄且电磁波长较长,这限制了无线感知的分辨率/精度。另外,受限 5G-A 基站的全双工收发能力,基于正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号的感知能力不如传统雷达信号成熟

可靠。上述这些架构机理多重制约因素,都较大限制了“狭义通感/通算/通智一体化”技术在 5G-A 系统中的融合应用。在大部分情况下,为了保证通信业务性能不受影响,5G-A 系统只能“尽力而为”地做感知和算智操作,具体表现在以下几个方面。

- sub-100 GHz 频段有限的带宽,导致无线感知的分辨率精度相对较低,难以高清动态成像。
- OFDM 波形和当前帧结构并非为感知类业务目的而原生设计,例如,5G-NR 在子载波为 120 kHz 时,支持的感知距离不超过 90 m;自干扰抑制的实现复杂度在单站做感知时,也对感知性能造成不小的限制。
- 5G-A 系统的网络级同步并非为感知类业务目的而原生设计,例如,微秒级同步精度可满足一般通信协作的需求,但是用于网络侧感知会造成巨大的误差。
- 5G-A 器件的非理想性也会造成限制,例如,在时分双工(time division duplex, TDD)制式下,上下行帧切换产生的相位偏差对通信没有影响,但是对感知操作却可能造成比较大的负面影响(5G-A 基站无法对接收的回波信号进行相干累计)。
- MEC 和 NWDAF 功能部署位于网络上游,离空口还较远,仍偏向“集中式”算智操作服务。
- 5G-A 系统传统的数据流模型(控制信令面/用户业务面)可能不适配“通感算智多业务一体化”。
- 基于 5G-A 系统的感知、计算、智能业务,较难有 QoS 确定性保障和自我性能验证能力。
- 在商业用例边界方面,还存在场景用例模式定位不清晰、业务逻辑交织的问题。

(4) 逐步追求按需可差异化的通感算智一体



化服务体系

对于通信类业务,经典的 QoS 服务机制和 5G 新引入的网络切片机制^[23-24],提供了系统按需可差异化区分的服务手段,即不同的通信业务可对应不同的 QoS 参数和网络切片承载,因此 5G 系统需要做相应的通信策略管控和资源配置。对于相对后期才引入的感算智类新业务,当前还更多地聚焦在它们的基本功能实现层面,尚未构建类似通信业务 QoS 和切片化的按需差异化服务体系,可暂称之为面向“通感算智一体化服务的广义 QoS 体系”。

例如,面向智能业务服务,业界已提出了诸如智能业务服务质量 (quality of AI service, QoAIS) 的概念,它是对 AI 业务服务质量进行系统性差异化评估和保障的一套新指标体系^[25-26]。面向感知业务服务,类似地,也可定义诸如感知业务服务质量 (quality of sensing service, QoSS) 的概念,它可以包含感知作用距离、感知分辨率/精度、感知成功率、感知误警率、感知服务连续性、感知时延、感知并发任务数等多维度性能指标参数集。可以预见,5G-A 网络或 5G-A 终端基于各自不同的感知技术手段,可以带来不同的感知性能区间;进一步地,5G-A 系统可以根据不同的感知任务需求对应的 QoSS 参数,选择合适的感知策略和方式方法,配置相应的感知资源等。

(5) 逐步追求通感算智一体化多方性能的联合提升优化

对于通感算智类业务,除了它们各自在自身功能和性能方面不断地互相促进和辅助提升,5G-A 系统还在追求它们之间的联合提升优化,即尽量不以牺牲某方面业务性能为代价提升其他业务。通感算智一体化不仅实现了多业务的有机集成和协作互助(即不同功能之间做“加法组合”),并且实现了更重要的价值意义:不同功能之间深度融合、互助互惠,系统效果、效率联合提升优化(即不同功能之间做“乘法融合”)。例如,在

保证系统通信业务性能不变的前提下,如何进一步提升感知业务性能;或在保证系统感知性能一定的前提下,如何进一步提升通信业务性能。在基于 5G-A 系统的 IMT-2020 (5G) 推进组通感一体化早期可行性测试验证中,可略微放松操作行为要求,允许通过牺牲一定的通信资源和性能为代价实现验证预期的感知功能效果;而后期更成熟的技术应更追求:不以牺牲通信资源性能为代价的同时实现预期的感知功能,例如,基于用户业务数据无线传输信号同时实现环境感知。

通感/通算/通智一体化在 5G-A 系统中的技术发展模式五大特征示意图如图 4 所示,可概括上述五大技术发展模式特征,它同时也对应着未来 6G 新系统下的通感算智一体化技术发展模式特征方面,具体对比分析可见第 3 节。

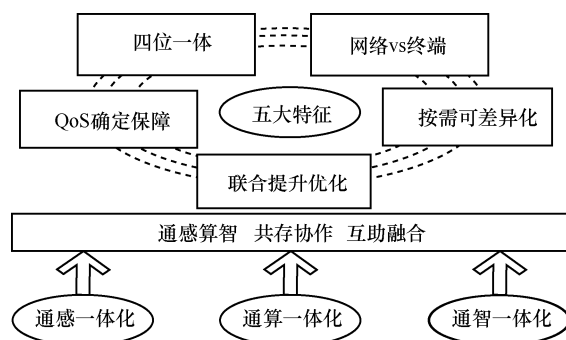


图4 通感/通算/通智一体化在 5G-A 系统中的技术发展模式五大特征示意图

3 基于 6G 的通感算智一体化技术发展模式

3.1 6G 应用场景和用例

未来 6G 移动新系统旨在支撑和实现万物智联、万务智联和智能普惠等愿景,它将有成为支撑各行各业更强大的智能基础设施平台,因此,6G 新系统的服务目标是实现全覆盖、全行业、全应用,进一步深化拓展 toC 和 toB 领域内更多新场景用例内涵。产业界已开始研究面向未来 6G 时代的新业务场景用例,如全息通信、触觉互联、超能交通、内生智能、数字孪生等^[3-4,13]。6G 新业务大致可分为以下三大类。

- 面向传统语音、数据、OTT 业务，进一步地用户体验增强和锐化（传输速率、时延、连接鲁棒性等），以实现“以用户为中心”的极致的用户体验。
- 面向 toC/toB 领域各类用户的智觉类新业务，提升被服务个体智能认知、决策、预测、安全等方面能力经验。
- 面向数字孪生新业务，实现针对客观物理世界的实时精准数字化映射和互动。

上述 6G 新业务由于更苛刻的 QoS 性能指标诉求，客观上需要更强大的 6G 新系统才能高效支撑和承载，即某些 6G 业务（如全息通信、数字孪生）5G-A 系统无法高效地承载实现。除了 6G 新业务、新场景的开发拓展，在 6G 新时代产业界也渴望迎来新的电信商业模式和新业态、新组网方式，例如，基于区块链技术构建可信网络^[27]、分布式去蜂窝化组网^[28]、空天地一体化卫星网络^[29]等。

3.2 6G 通感算智一体化技术发展模式

对照第 2 节所述 5G-A 情况，本节分析、总结通感算智一体化技术在 6G 新系统中的五大技术发展模式特征。

（1）6G 支持原生内生的“四位一体”

未来，为了适应 6G 新时代下不同产业跨界升级和新商业模式变革等诉求，6G 新系统将会是原生深度融合了通、感、算、智、存等功能于一体的超级无线基础设施平台，对内它将同时具备“通信”“感知”“计算”“智能”“存储”等方面更强大业务能力；对外它也能更强、更高效地提供“通信”“感知”“计算”“智能”“存储”等方面服务应用。因此，6G 移动新系统不仅会是超级泛在的无线通信管道，而且是巨大的分布式雷达传感网络、泛在算力网络和 AI 服务器阵列；在 6G 新系统基础之上，各行各业都将获得更深度赋能和升级转型动力。除了原生地实现通感算智“四位一体”，相比 5G-A 系统，6G 新系统还将以内生意图自驱的范式实现通感算智在资源编管控方面融合，例如，基于多维感知数据的

用例任务自生成和自驱动操作、以项目任务为中心的资源编排、以数据为中心的智能计算、AI 算法模型和数据的自生长等^[30-31]。通感算智一体化趋向通感算智原生内生深度融合示意图如图 5 所示，是图 4 在 6G 阶段的发展趋势预期。

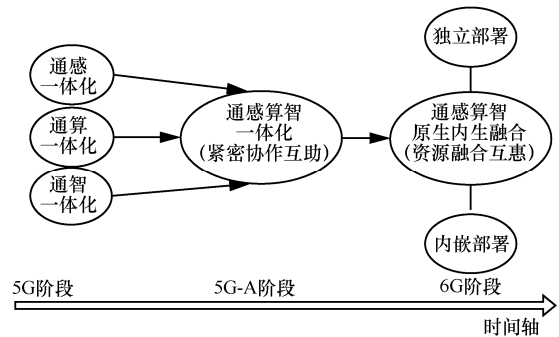


图 5 通感算智一体化趋向通感算智原生内生深度融合示意图

（2）网络侧和终端侧通感算智赋能齐头并进与竞合

未来，6G 新网络和 6G 新终端将继续深化自身的通感算智融合功能。随着移动运营去中心化、基础设施平台共建共享、分布式边缘化、运营轻资产化和本地灵活组网等方面诉求的进一步发展，新型更轻量级的网络节点和能承担（子）网组网功能的终端将可能会在 6G 新时代大彰其道。在 5G 时代，以集成式接入回程节点（integrated access backhaul node, IAB Node）代表的节点就已具备“基站终端二义性”特征。未来为了适应面向特定用例情境下边缘子网组网的需求，类似的“基站终端二义性”节点应用将会越来越多。只有具备了通感算智一体化融合功能的终端，才能在前述边缘子网的构建和服务中发挥出更大的价值，同时又能很好地契合到蜂窝大网的物理数字环境之中。在未来工业无线互联网场景中，以多智能体本地自组网协同完成较复杂任务为代表的应用中，智能体终端的通感算智一体化功能也将是基础^[20-21]。因此，随着未来 6G 终端逻辑地位的提升和价值不断被放大，6G 新网络和 6G 新终端在通感算智一体化自我赋能方面，也将会处于竞合局面。为了规避利益被冲击，移动运营商



必须考虑应对良策和电信新商业模式。

再以通感融合为例，6G 新网络和 6G 新终端都将会利用各自更强大的无线感知手段，进一步增强自身通信性能（提升容量/可靠性/能效/资源利用率、降低网络部署成本/时延等）、实现对感知对象模式识别（用户手势/表情/姿态等检测、环境中活动伙伴行为检测等）、实现更高精度定位/更高分辨率成像（无接触式安检、质检、材检等）和虚拟环境重构等功能目标。

（3）6G 新系统架构机理可支持“确定性有保障”地去做

6G 新系统的新架构和机理将面向通感算智综合能力和服务融合，传统的以 MEC 和 NWDAF 为代表的“外挂式”计算智能方式，将会以新范式形态，进一步与无线基站协议栈和其相关接口流程深度耦合，即算力和智能资源将会更贴近空口或边缘子网，以支持本地化和超低时延的部署应用。在统一融合的控制信令管控下，无线基站群和终端群中的大量算力智能资源，将会被最大限度地汇聚协调和利用，从而提升系统资源利用率且降低传输资源损耗。再以通感融合方面为例，6G 新系统将会进一步挖掘利用 Above-100 GHz~10 THz 的太赫兹频段，可用的无线带宽更宽且电磁波长更短，这更有利于确保无线感知分辨率和精度等性能^[32-33]。除了继续适配和改良对通信友好的 OFDM 波形信号^[34]，正交时频空(orthogonal time frequency space, OTFS)等新型波形也可更好地服务于无线感知目的^[35]。上述这些 6G 新时代的多重有利因素，可极大促进通感算智一体化在 6G 新系统中的全面融合应用，有望以确定性且有 QoS 保障的方式提供通感算智综合业务服务，具体表现在以下几个方面。

- Above-100 GHz 频段无线感知的分辨率和精度相对更高。
- 新改良的波形和新帧结构可为感知业务目的原生地设计和引入。
- 新范式 MEC 和 NWDAF 部署可离空口更

近，偏向“分布式”本地化赋能服务。

- 6G 新系统的新数据流模型（如感知面、计算面等）可更高效适配“多业务一体化融合”。
- 基于 6G 新系统的感知、计算、智能业务，可有 QoS 确定性保障和自我性能验证能力。
- 在商业用例边界方面，基于前期 5G-A 的探路实践和经验，6G 用例模式定位和业务逻辑可更清晰。

（4）6G 原生地支持按需可差异化的通感算智融合服务体系

第 2 节中描述的“通感算智一体化服务的广义 QoS 体系”对于 6G 新系统意义重大，它可以有力地促进未来 6G 新业务、新服务的商业开展和个性化/定制化服务。基于前期 5G-A 的应用实践经验，6G 新系统可原生地定义和引入全新、有实效的广义 QoS 体系参数集合，从而对外提供按需可差异化区分的通感算智融合服务。例如，面向感知类业务服务，6G 新网络和 6G 新终端可利用各自更丰富的感知手段，带来更宽泛的感知性能区间范围；进一步地，6G 新系统可根据不同感知任务需求和 QoS 参数的输入，选择合适的感知策略和方式方法，配置相应的感知资源进行操作。

（5）6G 原生地实现通感算智融合多方性能的联合提升优化

如前述，通感算智一体化更重要的价值意义是：实现不同功能之间的互助互惠、系统效果/效率的联合提升优化。由于 6G 新系统将会原生地支持通感算智深度地融合，6G 新系统将有望实现各类资源、信息和数据方面的最大化共享和利用；6G 各种业务之间的信息协同和处理流程将呈现出通感算智高度紧耦合配合的特征。由于 6G 新系统面向支持“全频段、全场景、全应用”，因此它还需要对尽可能多的电磁环境和物理、多维数字环境进行更充分的感知分析和数据归类，再结

合分布式泛在的智算手段,促进感知业务和通信业务性能的联合提升优化。6G 新系统更强大的通信传输性能,也将保障不同智能网元节点之间多维感知信息的高效共享流转,以及分布式智能计算信息的高效交互利用。总之,6G 通感算智深度融合,可更大程度地发挥出四者之间的资源复用共享和功能信息协同配合的优势,实现四者业务服务效果效能的联合倍增。

4 结束语

本文先介绍了通感算智一体化/融合的产业界发展背景和系统架构抽象,分析对比了通感算智一体化在“广义/狭义”方面的诸多差异和各方不同的技术侧重点。在此技术背景下,进一步系统地阐述了基于 5G-A 系统和 6G 新系统的通感算智一体化/融合技术发展模式的五大特征,并逐一做了技术特征对比分析,剖析了其背后的技术业态原因和驱动力。本文提出的通感算智一体化/融合技术发展模式的五大特征,可从整体上反映出:未来 ODICT 产业界在不同阶段,功能技术研究焦点和相关产品研发部署应用的节奏特点,从而有助于指导通感算智一体化技术在 5G-A 到 6G 发展之路上的循序拓展和商业应用推进。以上述技术发展模式“五大特征”为核心原则,业界也将进一步共同深入挖掘和开发与通感算智一体化相关的诸多技术和应用方面的细节。

参考文献:

- [1] 中国移动通信有限公司研究院,中兴通讯股份有限公司,等. 5G-Advanced 网络技术演进白皮书(2021)——面向万物智联新时代[R]. 2021.
China Mobile Research Institute, ZTE, et al. White paper for 5G-Advanced network technology evolution(2021)--oriented for new era of intelligent connections of everything[R]. 2021.
- [2] 中国移动通信有限公司研究院. 中国移动网络技术白皮书(2020 年)[R]. 2020.
China Mobile Research Institute. White paper for CMCC network technology(2020)[R]. 2020.
- [3] IMT-2030 网络工作组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 Network Working Group. White paper for 6G network vision, architecture and key technology[R]. 2021.
- [4] 6G Flagship, University of Oulu. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[S]. 2019.
- [5] STURM C, WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [6] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Code-division OFDM joint communication and sensing system for 6G machine-type communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12093-12105.
- [7] YANG Y. Multi-tier computing networks for intelligent IoT[J]. Nature Electronics, 2019, 2(1): 4-5.
- [8] PARK J, SAMARAKOON S, BENNIS M, et al. Wireless network intelligence at the edge[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(11): 2204-2239.
- [9] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS)(Release 16): TS 23.501[S]. 2020.
- [10] 3GPP. Architecture description (Release 16): TS 38.401: NG-RAN[S]. 2020.
- [11] 6GANA TG2. 6G 内生 AI 网络架构十问[R]. 2021.
6GANA TG2. Ten questions for 6G network architecture of native AI[R]. 2021.
- [12] IMT-2030 无线工作组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021.
IMT-2030 Wireless Working Group. Study report for integrated communication and sensing technology[R]. 2021.
- [13] 杨立, 赵亚军, 方琰崑. 从容量和覆盖升级到连接和品质: 论未来无线技术的盈利拓展[J]. 信息通信技术, 2020, 14(6): 57-62.
YANG L, ZHAO Y J, FANG Y W. From capacity and coverage to link and quality-profitable direction of wireless technology[J]. Information and Communications Technologies, 2020, 14(6): 57-62.
- [14] 欧阳俊, 陈诗军, 黄晓明, 等. 面向 5G 移动通信网的高精度定位技术分析[J]. 移动通信, 2019, 43(9): 13-17.
OUYANG J, CHEN S J, HUANG X M, et al. High precision localization technology for 5G mobile communication networks[J]. Mobile Communications, 2019, 43(9): 13-17.
- [15] Intel. RP-213588 Revised SID on study on expanded and improved NR positioning[C]. 2021.
- [16] ETSI. MEC in 5G networks[R]. ETSI White Paper No.28, 2018.
- [17] 齐彦丽, 周一青, 刘玲, 等. 融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 478-486.
QI Y L, ZHOU Y Q, LIU L, et al. MEC coordinated future 5G mobile wireless networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 478-486.
- [18] 3GPP. Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support network data analytics services(Release 17): TS 23.288[S]. 2021.
- [19] 3GPP. Management and orchestration; management data analytics(Release 17): TS 28.104[S]. 2021.
- [20] 康绍莉, 等. 后 5G 系统愿景与需求研究报告[R]. 2020.
KANG S L, et al. Study report for requirement and vision of-beyond5Gsystem[R]. 2020.
- [21] 尉志青, 等. 智能机器网络感-传-算一体化架构与技术研究[R]. 2022.



- WEI Z Q, et al. Study report for integrated sensing, communication and computing architecture with intelligent machine and network[R]. 2022.
- [22] 中国信息通信研究院, 等. 5G 通感融合演示验证测试规范[R]. 2022.
- CATR, et al. Specification for demonstration and testing of 5G integrated communication and sensing system[R]. 2022.
- [23] 杨立, 李大鹏. 网络切片在 5G 无线接入侧的动态实现和发展趋势[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 8-18.
- YANG L, LI D P. Realization and trend of network slicing in 5G NG-RAN[J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(6): 8-18.
- [24] 方琰崴, 陈亚权, 李立平, 等. 5G 网络切片解决方案和关键技术[J]. 邮电设计技术, 2020(3): 70-74.
- FANG Y W, CHEN Y Q, LI L P, et al. 5G network slicing solution and key technologies[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(3): 70-74.
- [25] 刘光毅, 邓娟, 郑青碧, 等. 6G 智慧内生: 技术挑战、架构和关键特征[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 68-78.
- LIU G Y, DENG J, ZHENG Q B, et al. 6G native intelligence: technical challenges, architecture and key features[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 68-78.
- [26] 李琴, 李唯源, 孙晓文, 等. 6G 网络智能内生的思考[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 20-29.
- LI Q, LI W Y, SUN X W, et al. Thinking of native artificial intelligence in 6G networks[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 20-29.
- [27] 聂凯君, 曹侯, 彭木根. 6G 内生安全: 区块链技术[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 21-27.
- NIE K J, CAO B, PENG M G. 6G endogenous security: blockchain technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 21-27.
- [28] 任震, 杨立, 谢峰, 等. 基于 5G-NR 演进浅析和展望未来 6G 系统中去蜂窝化技术的应用[J]. 信息通信技术, 2021, 15(2): 65-71.
- REN Z, YANG L, XIE F, et al. Analysis and trend prediction of applying non-cellular techniques in future 6G system based on B5G evolution[J]. Information and Communications Technologies, 2021, 15(2): 65-71.
- [29] 杨立, 窦建武. 未来卫星通信和 5G-NR 深度融合架构设计[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 60-66.
- YANG L, DOU J W. Architecture design for tight integration between future satellite communication and 5G-NR system[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(5): 60-66.
- [30] 6GANA. 6G 网络原生 AI 技术需求白皮书[R]. 2022.
- 6GANA TG1. White paper for technology requirement of 6G native AI network[R]. 2022.
- [31] 6GANA. 6G 内生 AI 网络架构十问[R]. 2022.
- 6GANA TG2. Ten questions for 6G network architecture of native AI[R]. 2022.
- [32] GAO X, SAQLAIN M, YU X. Towards converged millimeter-wave/terahertz wireless communication and radar sensing[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 18(1): 10.
- [33] MAO T Q, CHEN J X, WANG Q, et al. Waveform design for joint sensing and communications in the terahertz band[J]. 2021: arXiv:2106.01549.
- [34] LIYANAARACHCHI S D, BARNETO C B, RIIHONEN T, et al. Joint OFDM waveform design for communications and sensing convergence[C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [35] RINALDI L, TAGLIAFERRI D, LINSALATA F, et al. Dual domain waveform design for joint communication and sensing systems[J]. 2021: arXiv: 2111.12339.

[作者简介]



段向阳 (1973—), 男, 中兴通讯股份有限公司无线架构总经理、高级工程师, 负责中兴通讯无线系统技术规划和预研工作, 曾获陕西省科学技术进步奖一等奖、中国电子学会科学技术进步奖一等奖、深圳市科学技术进步奖一等奖, 主要研究方向为电信系统规划和关键技术预研。



杨立 (1981—), 男, 中兴通讯股份有限公司技术高级工程师, 主要研究方向为移动网络技术标准化, 涉及 ODICT 业态战略、系统架构功能演进&接口流程标准化、网络智能化等领域。



夏树强 (1976—), 男, 中兴通讯股份有限公司正高级工程师, 主要研究方向为 5G/6G 关键技术和标准预研。

韩志强 (1981—), 男, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为 WLAN、边缘计算、智能超表面等。

谢峰 (1979—), 男, 博士, 中兴通讯股份有限公司技术研究首席专家, 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室学术带头人, 主要研究方向为 6G 接入网架构。