



2024-2025年 无线网络发展洞察 白皮书

全域覆盖 场景智联

中信科移动通信技术股份有限公司
无线移动通信全国重点实验室
移动通信及车联网国家工程研究中心

2024-2025年无线网络发展洞察 白皮书

本白皮书版权专属中信科移动通信技术股份有限公司（以下简称“中信科移动”）所有，并受法律保护。如需基于非商业目的引用、转载、传播或以其他方式合理使用本白皮书的全部或部分内容，应完整注明来源。违反前述声明者，中信科移动将追究其法律和商业道德之责任。

一、5G 无线设备极致化，推动 5G 网络智简演进	01
二、蜂窝物联网高速发展，5G RedCap 成为市场增长新引擎	04
三、AI 驱动 5G 网络智能化，助推自智网络向高层次跃迁	08
四、信息通信技术深度融合，为行业应用定制确定性无线网络	11
五、5G-A 商用落地快速推进，6G 加速移动信息网络持续演进	14
六、超维度天线理念，引领未来天线技术和产品的发展	18
七、星地融合拓展全域立体网络，5G NTN 迎来产业化	21
八、绿色节能成为网络发展主旋律，支持全球可持续发展	25
九、通信感知一体化，支撑多场景多业务泛在应用	28
十、安全、可信、隐私保护，构筑 5G-A/6G 网络的安全基石	32



前言

蜂窝移动通信系统商业应用四十多年，无线网络得到飞速发展，引发人类社会生产生活方式的深刻变革。如今，5G 网络正在成为数字化转型和数字经济发展的重要基础设施，推动各行各业的数字化进程。中信科移动总结无线网络的发展情况和重要变化，提出了 2024-2025 年无线网络发展洞察。

5G 网络自 2019 年商用至今已经进入成熟期，5G 网络需要多频多模的融合基站和场景化轻量基站等产品形态支持网络的极简部署和覆盖下沉。同时，网络能力将向通算融合、绿色节能、智能运维的方向演进，以满足业务能力的升级和网络的可持续发展。RedCap 的引入丰富无线网络的物联能力，有效支持中低速率物联场景，将成为物联市场增长的新引擎。

5G 在行业应用中逐步深入，已经进入部分行业核心业务环节。在这个过程中，5G 为行业定制具有确定性能力的网络，并融合其他信息技术提供行业数字化转型的基本服务。边缘智能在提供低时延高可靠实时处理能力的同时减轻了数据传输的压力，成为“数转智改”的关键。

随着 3GPP 时间表的明确，6G 标准化已经正式展开。包括星地融合和通感一体化在内的诸多技术将在 5G-A 时期即展开商用，为 6G 奠定基础，6G 将实现通信能力多维度的提升，无线网络将从 5G 时代的移动通信网络向 6G 时代的移动信息网络发展。

无线网络的安全问题从未如此重要。应用领域的扩展和业务类型的增多，使得安全的内涵更加丰富，外延进一步扩展。安全、可信和隐私保护，将构建无线网络的安全基石。AI 在网络安全领域的应用也越来越重要，可以提升网络安全分析、识别、防护的效率和能力。

无线网络是数字化、智能化社会的基石，中信科移动期待学术界和产业界伙伴携手合作，打造精品无线网络，共创繁荣社会价值。

5G 无线设备极致化 推动 5G 网络智简演进

5G 网络进入成熟期，以 5G 网络为核心优化、整合、深化网络架构成为持续建设的主旋律。截至 2024 年 5 月末，中国 5G 用户数超 9 亿户，5G 基站总数达 383.7 万个，达到 4G 基站数量的 60%，5G 网络已经成为移动通信网的基础网络。面向未来网络长期发展，以 5G 网络为核心，优化、简化网络架构，成为蓄势提升网络能力、简化网络运维、支撑业务和应用创新的必然趋势。

运营商通常拥有多个商用频段，射频单元、天线一般与频段紧密定制化，在同一站点需要安装支持多个频段、多种模式的众多设备单元，给工程建设、维护、优化、传输供电配套等带来非常高的复杂度。以 5G 为核心实现基站设备的多频多模融合，支持站点的极简部署，成为基站主设备演进的主流方向。运营商 5G 网络已完成了全国乡镇以上连续覆盖，随着 5G 泛在覆盖的业务需求，5G 网络需要进一步下沉：包括乡镇农村边疆的广度扩展，向城市城中村、电梯、地停等高遮挡场景的深度扩展等。针对特定场景的大功率一体化基站、扩展型皮基站等特色产品，将成为 5G 设备发展的另一趋势。智算融合是未来基站的另一种发展趋势，面向 5G 多样化应用，基站在通信基础能力之外，具备通用算力和基础 AI 能力，提升网络性能，匹配业务需求，支撑 5G 的新型应用模式，是 5G 设备发展的又一趋势。

一、多频多模融合基站支持网络极简部署

5G 商用频段增加，网络支持多频段组合的需求增加，设备走向多频合一实现节能降本。由于用户对移动宽带的需求日益提升，使得运营商需要增加更多的频谱，随着各国对 5G 许可开放频谱的不断扩大以及运营商对原 2/3/4G 频段转模为支持 5G 或 4G/5G 双模，移动通信运营商的众多站点设备及天面系统需要改造或升级来支持多个频段工作。需要多种频段网络设备的融合设计，满足不同区域持续增长的容量需求。例如 700MHz, 800MHz, 900MHz, 1.8GHz, 2.1GHz, 2.6GHz, 3.5GHz, 4.9GHz 等频段，以及后续逐步商用的 6GHz 以上频段。但是工作频段越多，天面就越复杂，对应的射频模块也越多，站点功耗也越高，工程施工也越复杂，站点功耗不断攀升，会导致运营成本居高不下，影响可持续发展。

全频段持续演进，保持网络高效的更新换代，实现系统容量大幅度增长，同时要求通信网络建设简化，天面、能耗、工程及运维成本等不增或少增，

需要重构基站设计，满足网络面向未来的演进需求。采用多频 / 宽频、多天线融合等技术，可解决多频部署的挑战。设备基于内部多频 / 宽频、多端口架构完成从电路级到系统级的融合设计，实现软硬件从模块融合、载波信道融合到多频协同融合，达到设备成本降低，能耗降低，实现高效部署，支持向 5G-Advanced 以及 6G 的持续演进。

设备集成度持续提升，RRU 模块从支持单一频段，扩展到支持多个频段。将原来一个频段对应一个 RRU+ 天线的部署模式改变为对应多运营商需求的多频 RRU+ 多端口多频天线 + 大规模有源天线（按需配置，一般应用于高密度区域）的极简部署，实现设备成本、工程成本以及能耗的降低，并且支持不同频段间业务的动态负荷调节，可根据流量进行负载调整以及各种极致节能关断功能，持续降低中低负载下的设备能耗，实现运行能耗的极致降低，向无业务近零功耗的目标持续接近。

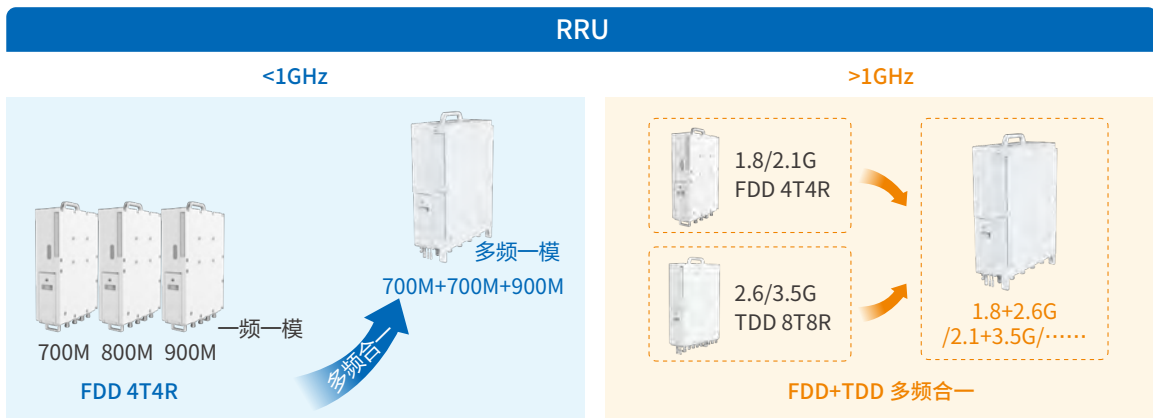


图 1-1: 多频多模 RRU 演进示意

二、场景化轻量基站支撑 5G 网络覆盖下沉

当前城区 5G 已经形成较好的连续覆盖，建设重点将转向室分深度覆盖和典型场景的信号升格。

5G 室分业务占比相比 4G 时代也将进一步提升，驱动室内网络建设整体向数字化方向转型。一方面，

5G 室分建设面临更大带宽、更高容量、更低时延、便捷部署等方面的挑战，同时需要支持开放 RAN 和网络切片等新兴技术，以提高网络的灵活性和扩展性。另一方面，针对农村、城中村、山区等中低价值区域，需要具备低成本建网、安装简易、灵活回传、维护便利等特色的解决方案。未来网络精准覆盖需求无疑需要场景化的网络建设解决方案。场景化轻量基站通常采用紧凑的一体化架构设计，如基带、射频甚至天线一体化，高集成度量身定制 SoC 芯片和器件，适度的容量、功率和带宽配置。场景化轻量基站具有以下独特优势，能有效支撑 5G 网络覆盖下沉。

一是低成本。相对于传统主设备基站形态，场景化轻量基站能以低成本方案快速满足运营商各类场景覆盖需求。场景化轻量基站支持多频多制式，能满足多制式、多网络的融合部署、平滑演进与高效运营的需求，同时设备高集成化及丰富的节能功

能降低了系统能耗和站点运营成本。

二是自带容量。场景化轻量基站相比于传统无源室分方案，能提供 5G 多小区以及 5G、4G 双模同时部署的能力，支持 2T2R/4T4R 配置，满足室内更高容量的需求，能满足大部分场景使用需求，提供更好的业务体验。

三是建网便捷。场景化轻量基站具备体积小、安装简单、功耗低、部署灵活等特点，能适应集中部署、站点下沉等部署方式，有效解决各种覆盖难题。场景化轻量基站集成了 BBU 和 RRU 功能，设备无需机房、直接上塔，支持 PON 回传和回传级联，简化了网络架构，实现站点建设化繁为简，降低建设及运维成本。

四是易于管控和维护。场景化轻量基站集成了先进的监控管理和网络维护功能，包括智能网络管理、精细化和可视化管控，以最大限度减少人工干预，降低维护成本，提升运营效率（OPEX）。

三、基站算力升级，实现通信能力提升和业务灵活适配

随着 ICT 技术的融合，基站已经逐渐成为边缘综合信息节点。面对 5G 覆盖场景的复杂多变、网络流量的持续增长、业务场景的开拓创新，在基站中引入通用算力和 AI 能力，使得网络能够实时感知无线环境变化、业务变化，从而实现空口性能优化、绿色低碳、业务适配。这种新型基站新架构不仅可以提升网络的性能和效率，还可以为公众用户和行业用户提供了更加个性化、高质量的服务体验，成为基站设备演进升级的重要方向。

在基站中增加算力最直接的方式是在基带单元（BBU）中增加算力板卡，使基站升级成为具备异构算力的边缘信息节点。算力单元（智能融合版）具备通用计算和 AI 智算能力，可以实现本地的智能决

策和自主优化。这种架构实现了与传统基站的兼容，可以支持已有基站的算力升级。当前的基站算力板卡已经可以支持本地化业务类型识别和差异化业务保障、精细化业务预测和节能控制、参数优化、感知融合处理等应用，未来的算力基站可以具备多样化更加灵活的架构，支持更进一步的算力和 AI 内生。

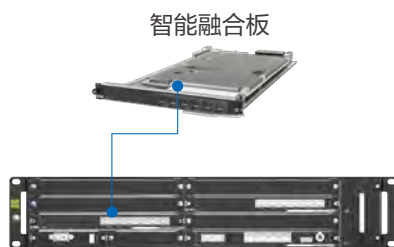


图 1-2: 基站 BBU 增加算力单元（智能融合板），提升基站智能

蜂窝物联网高速发展

02

5G RedCap成为市场增长新引擎

蜂窝物联网随着产业生态的快速成熟正在经历高速发展，成为数字生活、数字经济、数字社会变革的助推器。在这个过程中由于运营商能够提供更多的 IoT 服务，如智慧城市、智能家居、智能工厂等完整解决方案，蜂窝物联网营收逐渐成为运营商的主营收入。随着网络演进到 5G，轻量化物联网技术 RedCap 去年已开启规模部署，进入实质规模化应用阶段，它具有 5G 原生的更大容量、更优覆盖、更低时延等优势，此外延续了原有物联网的低功耗、低成本，能够服务于更多的业务应用场景如 AGV 实时控制、视频高清监控、电话手表等，给用户提供更好的感知体验。RedCap 将快速大规模商用是 5G 发展重要趋势，将在构建物联网新型基础设施、赋能传统产业转型升级、推动数字经济与实体经济深度融合等方面发挥重大作用。



一、RedCap 填补中高速物联网空白，促进蜂窝物联网快速发展

近些年我国三大运营商积极推动蜂窝物联网的部署和应用，已经初步形成窄带物联网 NB-IoT、4G Cat.1 和 eMTC 多网协同发展格局，网络覆盖和性能持续提升。在蜂窝物联网产业链上，我国也已形成涵盖芯片、模组、终端、软件、平台和服务等环节的较为完整的端到端能力。蜂窝物联网模组和芯片出货量正在快速增长，全国连接数从 2018 年底 6.71

亿到到 2023 年底 23.32 亿，5 年增长了近 3 倍。

随着蜂窝物联网深入生活、工业互联和智慧城市等社会经济进入万物互联时代，产生了一些新的需求，比如可穿戴的智能设备、智慧工厂传感器和远程控制、城市安防视频监控等需要更大带宽、更低时延、更高可靠性和更长的电池寿命。

	速率	时延	可靠性	电池寿命
 可穿戴	下行 5-50Mbps 上行 2-5Mbps	宽松	N/A	至少几天或 1-2 周
 工业无线传感器	<2Mbps	<100ms	0.9999	至少几年
 视频监控	2-4Mbps(经济型) 7.5-25Mbps(高端型)	<500ms	99%-99.9%	N/A

图 2-1: 新型蜂窝物联场景需求

市场需求催生了蜂窝物联网技术也在不断演进，传统的 NB-IoT 和 LTE 物联网技术受限时延和速率只能承载中低速物联网业务，对于中高速业务 5G 引入了更先进的 RedCap 蜂窝物联网技术。相对于

现有窄带物联网，RedCap 基于 5G NR 的空口技术，继承了大带宽、多天线、高阶调制等方面的优势，同时在设计上也兼顾了成本，完善并补齐了 5G 在物联网体系中的技术演进。

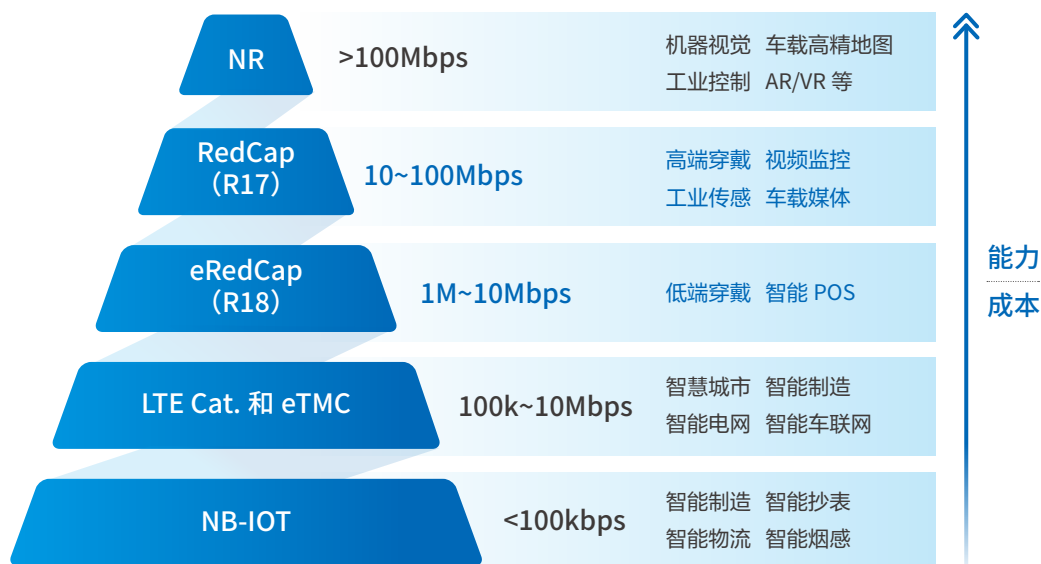


图 2-2: 蜂窝物联网技术能力演进



二、Redcap 继承了 5G 原生能力，将成为市场增长新引擎

5G 轻量级 RedCap 物联网新技术通过缩减 NR 终端带宽、减少天线数、降低调制阶数等方法，有效降低终端复杂度及成本和功耗，同时它也延续了 5G 原生态技术，相对于 4G 的 NB-IOT，RedCap

继承了 5G 原生能力，具有更大容量、更好覆盖、更低时延、更强隔离等优势，能有效满足可穿戴、数据采集、视频监控、智能制造等新业务发展需求。

蜂窝物联网技术	NB-IOT	LTE eMTC	eRedCap	Redcap	NR
最大带宽	180kHz	1.4MHz	20MHz 或 5MHz(FR1)	20MHz(FR1) 100MHz(FR2)	100MHz(FR1) 200MHz(FR2)
终端天线数	1T1R	1T1R	1T1R/1T2R	1T1R/1T2R	1T2R(FDD) /1T4R(TDD)
最大调制阶数	QPSK	16QAM	64QAM (256QAM 可选)	256QAM	256QAM
下行峰值速率	127Kbps	300Kbps	10Mbps	226Mbps	1.7Gbps
上行峰值速率	159Kbps	475Kbps	10Mbps	120Mbps	250Mbps
时延	10s	1s	20-100ms		5-20ms

图 2-3: 蜂窝物联网技术对比

RedCap 的低成本和高性能特性使得其能够广泛应用于各种物联网场景，如在工业物联网中，RedCap 技术可以实现设备之间的实时通信和数据共享，提高生产效率和质量。在视频安防领域，RedCap 技术能够解决 4G 网络容量有限、无法同时支撑多设

备接入的问题，为各种监控场景提供更可靠的网络支持。此外，RedCap 技术还可以应用于智能家居、智慧城市、远程医疗等领域，为人们的生活带来更多便利，它的大带宽高可靠低时延将成为泛在物联网的助推器。

2023 年底各运营商已完成大规模、全场景、全产业链的 RedCap 现网规模试验，同时推动芯片、终端也已达商用水平，2024 年初，国内 22 万基站已商用开通 RedCap 功能，实现城市业务区连续覆盖。RedCap 引入带动了蜂窝物联网市场 4G 转 5G，用户和收入也在不断攀升，截至 2024 年 4 月末，国

内三大运营商发展的蜂窝物联网用户已达到 24.4 亿户，收入排名全球蜂窝物联网市场前三位。预计到 2027 年将实现 22% 的复合年增长率，5G RedCap 大带宽高可靠低时延引入成为助推蜂窝物联网市场增长的新引擎。



三、增强型 eRedCap 标准已冻结，网络将持续演进快速形成商用能力

为了持续推进 5G 物联网技术向更低阶的终端产品渗透，使其更好适配智能电网、智能采集、智慧物流等速率需求更低、终端成本更敏感的应用场景，3GPP 在 R18 还将引入增强型 eRedCap 技术。eRedCap 以 10Mbps 的峰值数据传输速率为目标，定义了两种降低终端复杂度的方案，同时兼顾终端节能技术的进一步演进，其能力介于现有 LTE 物联

网技术与 R17 RedCap 技术之间，标准已于 2024 年 6 月冻结，产业链也将快速跟进，预计 2025 年形成商用能力。

2025 年后，5G eRedCap 产业将进入规模发展阶段，预计在 5G+工业互联网、5G+智慧城市等垂直行业以及智能安防监控、新型穿戴设备、远程操控设备、高清视频监控等应用领域，将成为大显身手的舞台。



图 2-4: 工业机器人物联网应用



图 2-5: 智能仪表物联网应用



图 2-6: 可穿戴设备物联网应用

AI 驱动 5G 网络智能化 助推自智网络向高层次跃迁

随着信息技术的飞速跃进，人工智能（AI）已崛起为全球经济社会发展的核心驱动力。在这一时代背景下，5G 自智网络（Autonomous Networks）也得到了全面而深入的发展，为数字经济注入了强劲动力。

至 2024 年中期，较多头部运营商将人工智能纳入战略规划。未来三年，全球预计将有超过 90% 的运营商将自智网络视为其核心战略。未来自智网络将围绕大模型、数字孪生和应用场景化形成了一个从数据智能分析到自主管理、优化与决策的闭环系统。它们相互依存、相互促进，共同推动了移动通信网络的创新和发展。



图 3-1: 自智网络目标架构



一、自智网络关键应用逐步成熟，朝着多域多维延伸，促进降本增效

随着网络规模的持续扩张和用户需求的多样化，传统人工运维模式显得力不从心。自智网络通过深度融合自动化与智能化技术，可成功应对更加复杂的组网、更多的业务应用以及更加多的用户连接带来的挑战，同时可以大幅提升运维和运营的质量和效率。

运营商大部分已将 L4 高阶自智目标定在 2025 年至 2027 年。自智网络产业已进入实质部署和快速发展的关键时期。依靠强大的 AI 技术，自智网络从网络规划建设到维护优化运营，显著提升了网络的智能化水平。AI 技术通过感知和预测，使移动通信网络能更精准地把握环境、网络状态与业务体验，

为网络优化提供科学依据；AI 技术通过通过构建关联评估模型和业务感知评测体系，实现基于用户感知的网络优化和精准业务识别，提升用户体验和满意度；AI 技术还可以助力基站智能感知环境变化，动态调整资源分配，确保网络的稳定与高效运行、

AI 数据在通信网络的应用领域既蕴含着巨大的机遇，也面临着不容忽视的挑战。例如为保障用户的体验，网元需要在极短时间内作出快速决策和挑战，对于算法和算力要求高。同时通信网络技术快速迭代，业务需求多样化对自智网络技术的泛化能力要求也日趋提高。这些因素共同制约自智网络的发展速度，但也为其持续优化与创新提供发展方向。

二、大模型与通信技术结合，引领网络运营及维护生产力提升

2024 年一季度，全球人工智能大模型数量已达 1328 个，我国占比 36%。其中 10 亿参数规模以上的大模型数量超过 100 个。在通信领域，顶尖运营商与领军企业竞相推出创新大模型，树立智能化转

型的行业标杆。这些模型包含 10 亿参数到万亿参数规模，集知识抽取、人性化交互、跨语言多模态沟通及自主学习进化于一身，依托海量网络数据，展现出卓越的泛化能力与精准的意图理解能力。通过

北向接口与底层网元无缝对接。大模型加速推动自智网络的迭代升级，引领行业向更加智能、高效的方向迈进。

在构建自智网络的过程中，大模型充当了意图识别、智能分析、业务编排的角色。通过大模型，可以对来自传感器、物联网等的数据进行深度学习和分析，提取出关键信息和特征，为数字孪生构建和自智网络决策提供支持。通过融合 agent 与 copilot 等技术，大模型将为网络规划、建设、运维、优化、运营注入智能化动力，赋能无线专业知识学习、研发效率提升、网络孪生构建、精准感知优化及网

络提效等关键领域。其创新性架构通过灵活调度多专项小模型，为全面智能化转型奠定坚实基础。

大模型在带来技术红利的同时也面临着挑战，尤其是算法偏见与误导性结果的风险。鉴于通信行业对高可靠性的极致追求，当前大模型的应用策略更趋向于稳健前行，更多的是布局于低风险场景。未来，随着新技术的引入，特别是对抗性训练的深度融合、多模态数据更广泛的应用，以及模型监控体系的日益完善，大模型将更加稳健地进入更多场景并真正落地生花，推动大模型成为自智网络能力跃升的引擎。

三、数字孪生技术突破物理网络时空约束，助力算法迭代，大幅降低试错成本

数字孪生可作为大模型与自智网络之间的桥梁，由大模型调度，并将多模态转译的数据转化为可视化、可交互的虚拟模型。数字孪生不仅能反映通信实体当前状态，还能模拟其未来行为和性能，为自智网络的决策和优化提供重要依据。

在通信领域，数字孪生技术可以应用于网络安全、规划部署、参数优化、智能运维及业务创新等诸多方面。例如数字孪生技术能够模拟网络运行状态，通过数据建模使得网络能够自主感知、决策、优化，提高网络的稳定性和可靠性，降低运营成本；通过对实际物理系统的数字化建模和仿真，可以在

孪生环境中对算法进行反复测试和优化，如以数小时的孪生测试模拟数年的真实场景，研发和验证周期大幅缩短；通过对物理世界各设备的数字化映射，形成一个互联互通、高效协同的数字生态系统，加速新业务和新服务的推出；数字孪生技术可以在虚拟环境中模拟网络攻击和漏洞利用，帮助企业提升网络安全防护能力等。

数字孪生技术应用过程中也面临数据隐私保护、技术标准制定及跨领域协作等挑战。安全、标准和开放合作是数字孪生技术在网络自智领域的深入发展与应用的关键。



信息通信技术深度融合 为行业应用定制确定性无线网络

截至 2023 年年底，我国“5G+ 工业互联网”项目建成超 8000 个，5G 工厂项目达 1800 余个，5G 行业应用已融入 67 个国民经济大类，应用案例数超 9.4 万个。其中，工业、矿业、电力、港口、交通等垂直行业应用广泛。通信、计算、AI、数据等信息技术不断融合，使能 5G 进入垂直行业的核心业务环节，助力行业提质、降本、增效。随着 5G 在垂直行业领域应用的不断深入，行业用户对网络能力、边缘能力和网络运维提出了更高要求。

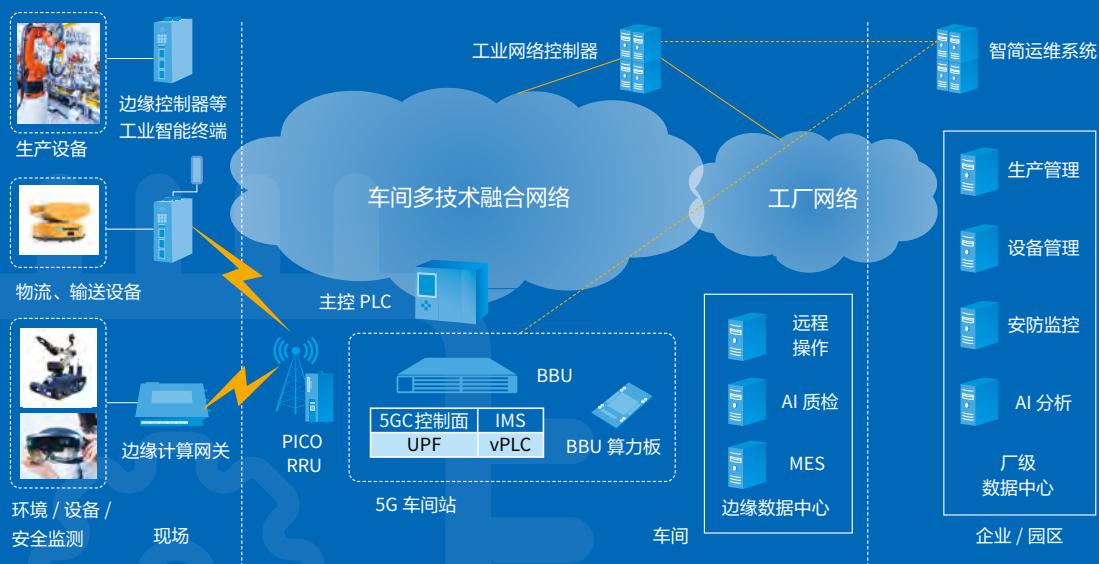


图 4-1: 算网融合的工业网络

一、5G 垂直行业应用逐步进入核心业务环节，对网络能力提出多维度要求

确定性能力的定制化网络是 5G 垂直行业应用的必然要求。随着 5G 深入到行业核心业务层，通信的确定性能力直接影响生产活动的品质和安全，行业需要 5G 提供定制化确定性网络能力。例如确定性的时延抖动、数据通信的可靠性、通信 QoS 的保障性等，以满足企业生产网的业务需求。对于企业生产网络，需要 5G 与车间核心控制流程融合，例如利用 5G 技术集成工业总线 / 以太网、可编程逻辑控制器（PLC）、传感器、无线射频识别（RFID）等技术进行数据采集、传输和设备控制，实现集生产控制、运行维护、品质监控、物料监控于一体的制造系统协同化解决方案。为实现满足行业核心业务要求的定制化确定性 5G 网络，引入 5G TSN、uRLLC、多载波聚合、灵活帧结构、高精度定位等技术是必然趋势。并且，5G 网络与其他有线（例如总线技术）、工业无线、工业物联及定位等技术的融合也十分关键。

一定通信速率保障情况下的低时延高可靠通信是垂直行业的刚需。在行业进行数字化、无人化、智能化转型的过程中，企业提高生产过程可控性，提高企业的生产效率和产品质量，满足一

定通信速率的高可靠低时延的通信至关重要。工业领域的设备投入巨大，无论是机床、生产线，还是机械设备，生产过程中的故障导致的停工，往往会影响整条生产线，甚至整个产品交付周期。典型业务例如智能制造中的机器间协同自动控制 / 机器人外挂 I/O 无线化、智能电网中的差动保护等。

对上行高速率的需求是垂直行业的典型特征。与传统以下行为主的 2C 业务相比，垂直行业在部分场景对上行速率的要求更高。比较典型的例如视频监控、远程控制、机器视觉、XR 等应用，均存在对大上行能力（包括单点上行速率以及单小区上行容量）的需求。并且随着从高清到超清、以及机器视觉对检测精度的不断提升，未来对上行能力的需求也会逐渐提升。高精度的视觉业务要求上行 Gbps 的速率，通过 MIMO、多载波、灵活帧结构等技术可提升 5G 系统上行用户速率，满足工业场景的业务需求。此外，相对于 FR1，毫米波拥有更大的可用带宽，可以带来更高的通信速率，对于速率要求更高的工业应用场景，例如车地转储、高清视频回传等，采用高低频组网方式，利用毫米波为行业用户提供区域的高速率通信能力也是未来的发展方向之一。

二、边缘计算是云边端协同关键环节，是行业“数转智改”重要途径

随着智能制造、新型工业化的推进，边缘计算成为企业“数转智改”的重要途径，通过在靠近数据源的地方进行数据处理，实现了低延迟、高带宽利用率和增强的隐私保护。边缘计算算力的平均增长率远超整体算力的平均增长率。边缘计算应用已覆盖 40 多个工业领域。已深入到工业设计、制造、

管理、服务等各环节，并在制造业、能源、港口等领域规模应用。另外边缘计算与控制装备融合受到广泛关注，vPLC、边缘控制网关等融合装备成为研究热点。

工业现场多样化传感器、机床、装置、AGV/RGV 等设备接入生产制造系统，需要端侧提供丰富



的 IO 接口和协议转换能力。本地自治、现场智能、以及边缘控制等高可靠低时延应用，需要在端或边缘侧提供实时的计算能力。工业智能的应用，采用云端学习训练模型、端侧或边侧部署执行，大量数据在端侧或边侧处理，减少对云端以及传输的压力。

5G+ 工业互联网是智能制造新型的信息基础设施。位于现场设备侧的 5G 工业通信网关、5G 边缘计算网关提供接入、协议转换、可编程和分级的计

算能力，并支持智能应用容器化部署。部署在工业现场的 5G 基站（5G 车间站）内置算力支持容器化、虚拟化，可按需部署工业 UPF 以及核心网控制面功能，构建高可靠、低延迟的专用网络，实现企业 5G 专网建设新模式。通过部署 vPLC 实现实时控制要求，部署集群调度应用，提高生产指挥调度性能。满足了企业实时性和安全性要求。

三、企业网络趋于复杂多样，智简运维提升网络管理效能

企业网络是 IT 与 OT 深度融合的异构网络。企业通常缺乏专业的 CT 运维人员。此外，企业网络要求网络具备更高的敏捷性与灵活性以应对快速变化的业务环境。所以，为保障多样化的企业业务体验，网络在复杂度、覆盖范围、敏捷灵活以及安全可靠等方面，对企业网络的管控提出了挑战，需要优化网络管理效能，甚至免运维。

智简运维作为一种先进的网络管理理念，对企业网络管控的意义比对公网更大，自动化程度要求更高。智简运维深度融合了 AI、大数据、网

络数字孪生及可视化等先进技术，实现了网络管理的智能化与自动化，赋予网络自主智能的能力，使其能够自动感知业务需求和无线环境变化，实现网络、工业智能应用、安全功能等的自动编排、自我配置、实时监控、动态调节、故障自愈及性能优化等功能。这一转变不仅显著提升了故障检测与响应的效率，降低了对网络运维人员数量及专业技能的依赖，还有效控制了 OPEX，为企业持续的业务增长和数字化转型提供了坚实的技术支撑和高效的管理保障。

5G-A 商用落地快速推进 6G 加速移动信息网络持续演进

2024 年 6 月，3GPP 5G-A 标准第一个版本正式冻结，5G-A 的规模商用被提上日程，业界普遍认为 5G 技术的升级演进将进一步促进 5G 与垂直行业的深度融合。同年，3GPP 明确 6G 标准制定时间表，其计划于 2025 年 6 月启动 6G 核心网和接入网的标准研究工作、标准规范制定工作，预期将于 2029 年完成 IMT-2030 的标准第一个版本发布。

6G 不仅要拓展现有 5G/5G-A 的通信场景，也要超越通信的范畴，支持更广泛的垂直行业应用，这与 5G-A 的商业部署一脉相承。为切实助力垂直行业数字化转型、带动国民经济提升，一方面需要在 5G 网络基础上进行升级演进，实现 5G-A 的规模商用；另一方面需要依托产学研用各界协同创新，深入挖掘 6G 部署场景与真实需求，启动以垂直行业需求牵引的应用研究，开展未来 6G 商业模式的顶层设计，共同推动 6G 移动信息网络与产业的良好发展。

一、5G-A 规模商用为 6G 发展蓄力，移动通信网络向移动信息网络持续演进

5G 在传统移动通信技术所面向的宽带移动通信场景的基础上，创新性地引入了海量机器类通信和超高可靠低时延通信两个典型场景，以期进一步通过 5G 移动通信技术带动物联网产业的发展。5G 在增强移动宽带应用上蓬勃发展，而在行业应用方面的表现仍亟需提升。

作为 5G-A 标准的第一个版本，3GPP 5G R18 标准于 2024 年 6 月正式冻结。5G-A 的技术革新主要体现在上行体验容量的提升、应用场景的拓展、系统容量的提升、低成本终端支持、广播多播增强以及网络切片增强等，并且进一步在 MIMO、XR 和卫星等领域做了很多新的探索。随着 5G-A R18 标准的冻结，业界普遍认为 5G 技术的升级演进 (5G-A) 将进一步促进 5G 与垂直行业的深度融合。

从 2024 年 2 月底，按照计划，3GPP 开始正式进入 R19 的研究工作，包含：5G 系统的持续增强，例如 MIMO, 移动性，SON 的增强；应用多样化的研究，例如无源物联网，卫星通信；全新的先进功能，

例如双工演进；以及业界普遍认为面向 6G 的技术先导，例如通感一体化，无线 AI/ML, 网络节能以及中频段信道建模等。R19 的研究内容标志着 5G-A 国际标准制定进入新阶段，为未来 6G 第一版本进行预先的技术研究和准备。

我国运营商正在积极布局开展 5G-A 相关技术试验工作，以期深入挖掘 5G 网络的扩展应用。据悉，部分运营商已经开展了 5G+XR、UDD、空天地一体、通感一体、无源物联、确定性网络、数字孪生、无线云基站、智能超表面等 5G-A 相关技术试验。运营商计划于年内建成全球最大规模的 5G-A 商用网络，并公布了包括北京、上海、天津、重庆、广州在内的首批 100 个 5G-A 网络商用城市名单。

5G-A 的规模商用将有利于延长 5G 网络的生命周期，保护运营商投资，深入挖掘移动信息网络的新型应用。同时，5G-A 的规模商用将实现与 6G 网络的有序衔接，为 6G 移动信息网络的遴选、标准制定、产品研发以及应用创新积蓄力量。

二、国际社会明确 3GPP 标准制定时间表，6G 标准阶段性规划基本确定

由于国际移动通信技术对移动通信产业以及相关产业的促进、拉动作用明显，每次移动通信技术升级换代都备受各国政府和企业关注。自 5G 国际标准发布以来，国际社会众多国家、地区、企业和研究机构纷纷启动 6G 预研工作，并把其作为谋求竞争新优势的战略方向，一场新的全方位综合国力竞争正在全球展开。

在国际社会产学研用各界的共同推动下，国际

电信联盟于 2022 年 10 月完成未来技术趋势报告，2023 年 6 月完成面向 2030 年及未来的 (6G) 框架和总体目标建议书，并计划 2030 年完成 6G 国际移动通信标准发布。国际电信联盟已于 2024 年启动 IMT-2030 第二阶段工作，着手开展 IMT-2030 的技术性能要求和评估指南的制定工作。

2024 年初，3GPP 初步明确 6G 标准制定时间表，计划 9 月份启动无线接入网的需求和 KPI 指标



研究工作。2025 年 6 月至 2027 年 3 月，开展核心网和接入网的标准研究工作，并在研究工作后启动核心网和接入网标准规范制定工作，预期将于 2029

年完成 IMT-2030 的标准第一个版本发布。在国际社会 6G 标准制定共识以及国家 6G 发展战略的支撑下，6G 标准与产业化发展时间节奏基本确定。

三、6G 将实现通信能力多维度提升，不断扩展服务领域、开拓信息服务能力

G 向 6G 演进的应用场景需求可归纳为两个方面：5G 作为基础演进的三大通信场景（沉浸式通信、超高可靠与低时延通信和大规模通信），以及新增加的三个融合维度（星地融合通信、通信感知一体化和通信与人工智能融合）。

以 5G 技术为代表的信息通信行业是构建国家新型数字基础设施、提供网络和信息服务、全面支撑经济社会发展的战略性、基础性和先导性行业。6G 将是在 5G 产业蓬勃发展的基础上进行的升级演进，在通信功能进一步增强的基础上，不断扩展其服务领域、提升其信息服务能力，形成新一代移动信息网络。与 5G 相比，6G 网络将为人、物、环境

以及虚拟空间提供智能极致互联的丰富服务。在地面通信功能增强的基础上，6G 也将从地面通信扩展到星地融合通信，达到全域覆盖，便于通信及信息业务服务的统一部署。而 6G 网络也将与数字、信息技术深度融合，支撑网络与服务的升级拓展，面对众多差异化场景，基于人工智能技术与通信系统的深度融合，提供恰当的连接、通信以及数据、计算、智能、定位、感知、安全等信息服务。

在国际电信联盟发布的 6G 框架和总体建议书中，明确 6G 的使用场景包括：沉浸式通信、超高可靠与低时延通信、大规模通信、通信感知一体化、通信与智能融合、泛在连接等场景。其中，沉浸式

通信、超高可靠与低时延通信、大规模通信是 5G 通信功能的增强场景，而通信感知一体化、通信与智能融合则是 6G 新引入的超越通信使用场景。通信感知一体化使用场景，典型的使用案例包括辅助导航、活动检测和运动跟踪（例如，姿势 / 手势识别、跌倒检测、车辆 / 行人检测）、环境监测（例如，雨水 / 污染检测），以及为 AI、XR 和数字孪生应用提供关于周围环境的传感数据 / 信息。通信与智能融合使用场景，典型的使用案例包括辅助自动驾驶、用于医疗辅助应用的设备之间的自动协作、跨设备和网络的繁重计算操作的卸载、数字孪生的创建和预测等。

为了支持 6G 实现超越通信场景，不断扩展其服务领域、提升其信息服务能力，6G 需要新型系统

架构与关键技术支持。6G 网络将由网络为中心向以用户为中心进行演进，支持集中式 + 分布式网络节点按需部署、即插即用，实现根据用户需求的场景定制、精准服务，并通过网络内生的智能、感知、计算、安全等能力，实现端到端分布式网络自治。以用户为中心的分布式自治网络（下图）将突破传统以蜂窝为中心的无线资源管理模式，资源分配与功能组合方式更为灵活有效，降低干扰信号对用户体验的影响，节省网络能耗，驱动超维度天线技术、无线 AI 技术、通感融合技术、高精度定位技术等空口技术融合升级。网络架构的变革与关键技术的升级演进，将促进 6G 网络的功能与性能不断提升，从而推动沉浸式 XR、全息通信、数字孪生等全新应用的不断成熟。

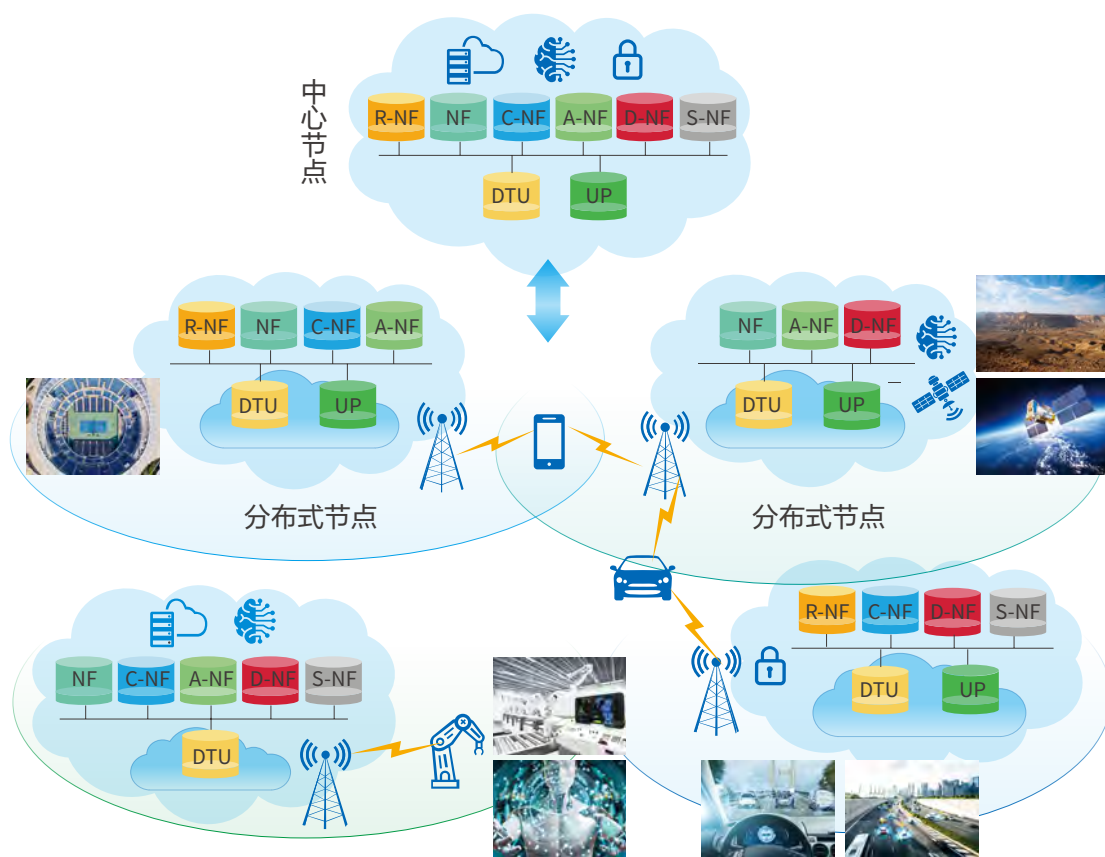


图 5-1: 以用户为中心的分布式自治网络架构

超维度天线理念 引领未来天线技术和产品的发展

天线技术一直是移动通信代际演进的主要关键技术。到 5G 时代，大规模天线 (Massive MIMO) 在信号处理方面综合了分集、复用和赋形多种技术，天线形式也演进至二维阵列形态，在水平和垂直都具有波束赋形能力。在向 5G-A 和 6G 的演进过程中，信号处理算法的多样化和精细化、阵列能力的进一步提升以及与场景的紧密结合仍然是天线技术发展的主要趋势。同时，还有两方面的因素对天线技术的演进有重要影响：一方面是信息通信行业的低碳绿色发展，要求网络和设备向绿色节能方向演进；另一方面，随着移动通信向低空、海面、空天等领域的覆盖拓展，以及移动通信与定位、感知等技术的融合，对移动通信天线在波束能力、扫描能力、感知能力等方面提出更高的要求。在传统移动通信基站天线技术演进的同时，与 AI 技术的融合及新型天线形态的出现将会对多天线系统空间维度的进一步有效扩展带来有力的推动作用，同时将有可能在一定程度上避免传统天线阵列技术在维度扩展方面所面临的复杂度、成本和功耗挑战，从而将带动基于新型天线结构的多天线传输与接收机制的研究与实践，为整体系统效能的进一步提升带来新的发展机遇。

超维度天线 E-MIMO (Extreme Multiple Input Multiple Output) 技术是多天线技术向空间维度、智能维度、能效维度扩展的天线技术，包括绿色高效能的多频融合天线技术、多维精准波束赋形技术、超大规模天线技术、全息 MIMO 技术等。

一、更高的空间自由度和分辨率是超维度天线技术发展的主要方向

大规模天线的演进趋势仍然包括增加天线孔径以实现更强的波束能力、对天线单元做更实时精细的加权控制以及对场景和业务的精准匹配等方面。超大规模 MIMO（多输入多输出）天线可以提供比大规模天线更多的空间自由度，空间分辨率提升，天线阵列增益更高，用户波束更窄，波束能量更汇聚，业务发射功率减少，降低对本小区及其他相邻小区的用户干扰。除天线单元数的增加之外，超大规模天线在分布方式（集中与分布）、赋形方式（数字与模拟）、阵列形式及与 AI 技术的融合方面都将做更多的创新。

在超大规模 MIMO 天线中，可重构超表面天线是一种新的天线形态，通过对可重构超表面中大量低成本、低功耗的可控反射或透射单元的调控，实现大规模天线波束赋形的效果，主要包含 RIS 和 RHS 两类天线，以更高的能效和更低的成本支持空间维度的进一步扩展。

无论是传统阵列形式还是 RIS/RHS 等新的天线形态，其趋势都是实现更高的空间自由度、更精准的波束赋形能力，从而充分利用天线孔径带来的空间分辨率。随着移动通信向 5G-A 及 6G 演进，特别是移动通信系统覆盖维度的扩展及与通感、AI 的融合，超大规模天线维度的扩展、波束的精准化及控制管理的智能化已成为必然趋势，新的天线形态也会在适合的场景得以应用。

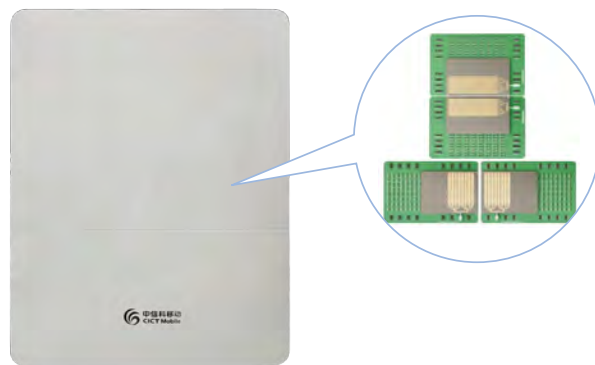


图 6-1:RHS 天线样机

二、绿色高效能成为多频融合天线发展的核心竞争力

在多频融合和双碳战略的大背景下，基站天线在设计时越来越需要考虑生产和应用中的碳排放和能量损耗。绿色低碳主题需要在天线的设计、生产和应用评价等多个方面开展研究。在设计方面，电调移相网络和功分馈电网络、辐射单元及阵列效率直接影响天线的辐射效率。在材料方面，天线外罩的材料会有苯乙烯、氯化氢等有毒气体产生，产生环境污染。在加工工艺方面，有铝合金压铸后电镀和 PCB 蚀刻等。电镀过程有废水、废气等排放。在包装运输方面，天线的缓冲材料回收难度大、回收价值低。

针对现有基站天线技术和产品面临的问题在馈电网络、辐射单元、天线罩、工艺及包装运输等方面，多频融合和绿色高效能成为基站天线演进的主要趋势：

少线缆或无线的馈电网络技术：少线缆技术是缩短移相器和阵子部件的电缆连接，可明显提升天线效率，是目前主流的技术方案之一。无线缆技术主要有两种实现方式，一种是移相器腔体和反射板共用的一体化，振子与移相器通过转接连接或直接连接；另一种是一体化的移相馈电网络和辐射单元组件耦合馈电。

天线系统效率提升的辐射单元及阵列技术：提升单个单元的增益及辐射效率，提升单元的匹配和降低损耗，如二元阵合路集成到低频碗状辐射单元的底座上，一体成型。优化巴伦的宽带匹配特性可以减少边频失配损耗。在阵列方面，可以采用低频辐射臂上加高频去耦滤波枝节，降低低频对高频的影响，提升高频辐射单元的辐射效率。

新型复合材料天线罩设计：如通过对热塑性改性，获得低介电常数和低密度的增强塑料材料；或以树脂材料为基础，通过玻纤掺杂形成塑胶合金等。生产过程将更环保，生产的产品和材料可回收利用，在保持足够强度的情况下获得低损耗特性，从而提升天线的性能指标，降低天线设计难度。

多种工艺提升技术：采用不同辐射单元的工艺形式，如钣金工艺实现免电镀，生产过程中无废水和废渣，废料也可重复回收利用。在馈电方案中实

现免电镀技术，比如采用耦合馈电，避免或减少焊接点；焊接点无需电镀，直接采用激光焊接实现金属与金属焊接；局部面积电镀或其它镀膜方式，如真空离子镀膜等。

多种环保材料包装探索：如瓦楞纸板、蜂窝纸板、淀粉发泡等可降解或回收利用的材料，提升材料的复用率，减少材料的用量，进而降低碳排放。或采取可循环再生的包装设计方案，单次包装运输化为多次利用等。

随着绿色转型的持续升级，产业链上下游将在包括材料、设计、制造、应用的全生命周期内各个环节遵循绿色节能的原则，实现共同转型。

多频融合天线技术和产品正在向绿色高效能的方向持续演进，它不同于只偏重性能指标的传统天线产品，越来越向着关注产品背后的绿色环保等社会价值的方向发展。

三、具有多维波束能力的阵列天线成为主流需求

在4G后期，3D-MIMO将垂直维度的波束赋形引入到移动通信系统中，使基站的波束能力得到进一步拓展和增强，三维阵列形态也成为5G宏基站的主要天线形态。目前在垂直维度的数字通道数量有限，随着场景化对精细化覆盖的需求，数字+模拟方式的天线阵列是重要的演进方向。一方面能够通过“数字+模拟”加权的方式实现更精准的波束，充分利用天线孔径。另一方面不必通过增加数字通道而节约成本。在毫米波频段，数模混合天线是主要的天线形态。在低频段，数模混合阵列和波束赋形方法也是发展的重要趋势。由于模拟波束的管理与系统时频资源关系密切，是数模混合天线应用的关键。

此外，定位、感知等应用的扩展对基站天线技术提出了新的要求。对通信来说，基站天线的设计更多

考虑信号强度、信噪比、干扰或者多用户复用情况下的空间隔离度，波束的设计和管理也依据这些原则进行。在定位、感知等场景下，一方面，需要更精准的多维波束以便测量用户和感知目标的角度信息，波束对空间的分辨能力直接影响角度测量的精度；另一方面，特别是对感知信号来说，其波束与时频资源的映射关系以及波束管理也与通信有差异。

对低空覆盖来说，由于感知与通信覆盖能力的差异，以及对波束能力要求的不同，会存在低空通信天线和低空通感一体天线两种方式，后者是未来的主要演进方式。由于需要对各种波束方向图进行精准的设计和控制，会衍生新的技术和产品形态，以满足技术发展对多维波束能力的需求。

星地融合拓展全域立体网络 5G NTN 迎来产业化

地面移动通信现在已取得了巨大成功，但在偏远地区、海洋等区域仍难以实现有效和低成本覆盖，并且在地震和洪水等自然灾害时地面移动通信抗毁性差也是一个需要解决的问题。卫星通信能够以低成本实现广覆盖，近年来宽带卫星取得显著进展，同时手机直连卫星技术的发展满足了在地面移动通信弱覆盖地区保持通信连续性的需要。卫星通信和地面移动通信的融合（简称星地融合），能够充分发挥卫星通信的覆盖优势和地面移动通信的容量优势，使移动通信从传统的地面网络拓展成全域立体网络，实现空天地海泛在通信。

手机直连卫星是星地融合的典型应用。目前主要基于在轨卫星及定制协议的双模方式，支持短信或者语音服务。但人们更期待随时随地接入且无感知切换的高速率传输等宽带应用。随着国际标准组织 3GPP 在 R17 完成 5G 非地面网络（NTN）第 1 版标准，5G NTN 开启了产业化工作。另外，5G NTN 技术也在持续增强，预期会成为手机直连卫星的最先进技术路线，并向 6G 星地融合演进。

一、星地融合从“5G 体制兼容”走向“6G 系统融合”

在5G设计之初，卫星通信并未纳入考虑。随着技术的演进和需求的发展，在5G的第一个商用版本R15的标准化后期，3GPP开展了5G NTN研究。5G NTN的引入主要是为了填补地面移动通信的覆盖盲点，如偏远地区、海洋及灾害应急通信等。由于5G NTN与地面5G在体制上的兼容性，可以充分利用并分享5G地面移动通信的产业链和规模经济效益，从而降低成本和提升效益。

然而，在5G NTN标准制定过程中，3GPP并未完全满足卫星通信系统的实际需求，只是对地面5G标准作了适应性的修改，未能充分发挥出卫星网络能力。因此，星地融合在5G时代更多是卫星通

信在标准体制上借鉴地面移动通信的“体制兼容”，卫星通信和地面移动通信在很大程度上仍然是各自独立的体系，两者并未深度融合。

地面移动通信与卫星通信的系统融合成为6G星地融合的设计目标。两种不同信道接入方式均被考虑，并且有机融合，采用统一的空口协议，进行统一的频谱规划和管理，形成统一的6G系统。系统无需专用的卫星手机，而是采用融合的终端、融合的网络和业务，终端将能够同时接入地面节点和卫星节点，并可以在地面节点和卫星节点之间无感知切换，享受一致的通信体验。

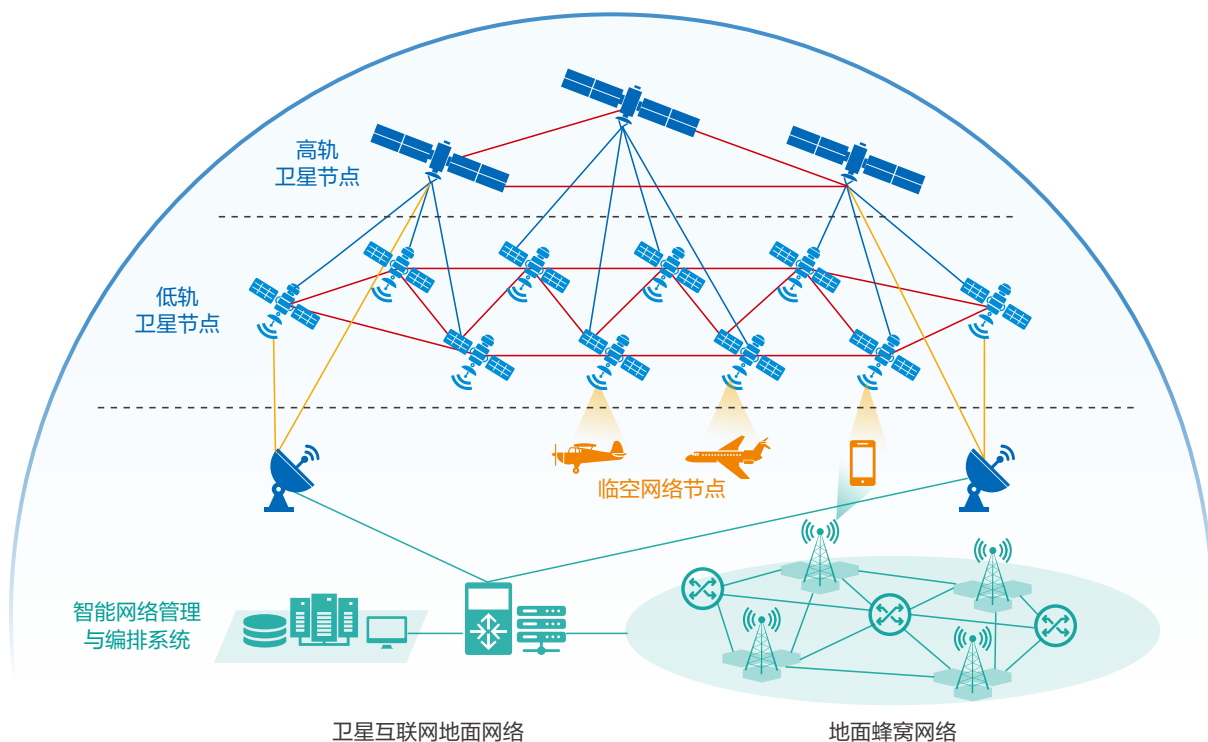


图7-1: 星地融合的立体网络

星地融合移动通信网络是一个多维复杂的“巨系统”，面临复杂跨域组网、大时空尺度无线传播、

高动态网络拓扑、低业务质量等技术挑战，需要设计灵活、可扩展的网络架构以适应多种不同的接入

方式和业务需求，需要创新的无线传输技术和优化算法以提升传输效率，需要高可靠的移动性管理机制以保障切换的成功率，需要进行端到端 QoS 优化设计以保障通信的连续性。星地融合将推动移动通

信网络的广泛应用，覆盖全球每一个角落，不仅服务于偏远地区、海洋和灾害应急通信，还将支持智能交通、无人机、物联网等多种新兴应用。

二、手机直连卫星作为星地融合的典型应用成为研究热点

手机直连卫星虽然在 20 世纪末“铱”系统时期兴起，但因为是专用终端，价格高、话费贵，没有规模发展起来，仅适用于少数行业的特殊需求。随着卫星制造水平提升和发射成本大幅降低、集成电路技术与产业快速进步，以及人类活动范围的拓展和行业应用需求的扩展，卫星通信行业被注入了新的活力。近几年手机直连卫星再次成为了热门话题。多家公司均在测试或推出支持短信、语音和数据服务的手机直连卫星业务。

手机直连卫星主要支持三种技术路线：

技术路线一是基于现有卫星通信体制的手机直连卫星，采用定制手机和已有星座（俗称“新手机、旧卫星”）。其优势在于频谱资源相对丰富、部署速度快，也存在手机需要修改、必须集成卫星通信专用芯片、采用私有技术体制、应用全球推广和协调受限等不足。该技术路线已在“天通一号”系统实践，自 2023 年有多款商用手机内置专用芯片支持卫星通信，用户数发展到数百万。

技术路线二是基于现有地面移动通信体制的手机直连卫星，采用已有手机和新建星座。其优势在于手机无需修改、向下兼容性好、有一定的用户市场基础、待培育的用户数量较大，也存在必须与地面运营商合作、卫星设计难度较大等不足。该技术路线正被全球多家公司开展技术试验，新发射卫星已达上百颗。

技术路线三是基于 5G NTN 通信体制的手机直

连卫星，采用新研手机和新建星座。其优势在于与支持 NTN 技术演进的智能手机兼容、干扰风险最小，也存在需要规划新频率新标准、部署周期长等不足。该技术路线技术最为先进，向后兼容 4G LTE，向前兼容 6G NTN，目前国内外多个公司在积极开展设备研发和技术验证。

5G NTN 作为 3GPP 制定的“手机直连卫星”通信标准，支持宽带业务和窄带业务，具有技术先进性、利于前向演进等诸多优势。6G NTN 已在业界开启技术研讨，预期将发展为 6G 的重要特性。6G 要实现“人联、物联、万物智联”，需要一个全球覆盖的网络，手机直连卫星系统可实现地面与非地面（高轨卫星、低轨卫星、极低轨卫星、高空平台、无人机等）一体化通信，能为 6G 提供全球覆盖，除此还可以提供低时延、精确定位等能力，成为 6G 网络的重要组成部分。





三、5G NTN 技术验证广泛开展，促进产业成熟

近年来，业界在基于 R17 形成的 5G NTN 标准，不断开展样机或设备研发，并进行实验室或在轨技术验证。国际上部分公司为 NTN 验证了双向卫星通信信息传输、位置共享和紧急 SOS 呼救等功能，部分公司为 NTN 扩展了低频段的许可卫星通信频谱。国内发布基于 5G NTN 透明转发的高低轨一体化宽带卫星通信系统，完成了实验室验证以及与高轨及低轨卫星的在轨验证，支持语音、FTP 下载、卫星终端与地面移动通信终端双向高清视频通话等星地融合宽带业务。

虽然 5G NTN 的技术可行性、系统可用性经过了业界的论证与研究，但面向产业成熟发展存在工程实践困难、可获得的频率资源少、设备属新开发难度大、网络部署复杂等挑战，需要进行技术攻关和协议增强以稳固标准版本，需要考虑星载超大阵面相控阵天线以形成更多波束并提升波束的链路增益，需要确保卫星通信适用的频率写入 3GPP 标准，

需要复用地面产业从而加速设备研发进程并降低成本，需要考虑运营商单独组网、多运营商共建共享组网、多运营商漫游组网等多种网络运营模式。

不同于传统的卫星产业链，5G NTN 的发展能够充分利用地面 5G 产业链的基础和技术、人才等优势，打破了卫星产业传统封闭模式造成的缓慢发展状态。在技术与标准上，5G NTN 正在 3GPP 持续开展功能增强，当前的 R19 阶段正在开展下行覆盖增强、上行容量增强、再生模式增强、存储转发技术、星上数据交换等技术的研究。在产业上，虽然 5G NTN 相关的通信设备属于新开发，但其能够与地面产业做到最大程度的复用，从而加速设备研发进程，降低成本，形成规模经济效应下的高效发展。5G NTN 的产业成熟，将为 6G NTN 的技术与标准发展打下坚实基础，促进星地融合的 6G 统一系统实现，成为 6G 区别于以往几代移动通信的重要标志。

绿色节能成为网络发展主旋律 支持全球可持续发展

5G 网络的绿色节能不仅是运营商降低运营成本、提升经济效益的重要手段，也是国家可持续发展的必然要求。运营商在 5G 网络运营中面临高昂的电费和运维成本，其运营支出有 10%-25% 用于能源，其中大约 80% 被无线接入网消耗，因此需要通过不断采用节能新技术来持续降低成本。通信运营商和设备商都致力于通过技术创新和智能化管理，在保障 5G 业务量和业务体验的同时，实现网络高效节能。同时移动通信通过赋能其他领域，双重助力绿色低碳社会的可持续发展。

在移动通信网络方面，运营商和主流设备厂商在设备节能、散热及特殊场景节能方面开展了广泛的研究和部署工作。从打造 5G 绿色节能示范站到现网大范围应用推广，推动 5G 网络向绿色、高效、智能方向可持续发展。在产业界的共同发展促进下，绿色节能成为 5G 网络和未来 6G 的必然需求和重要评测维度。

一、设备级节能新技术，多管齐下促节能

5G 基站通过一系列新技术促进设备节能，包括多天线技术的增强、极致节能和新型硬件等技术手段，对比 4G 能够大幅提升传输的能效比。

大规模天线系统 (Massive MIMO) 具有高能效和低辐射的特性，5G 通过更大规模天线的精准波束赋形技术，能够将无线信号能量集中在更窄波束，提升无线传输能效。数模混合形态的大规模天线技术通过升无源、降有源的方式，进一步提升空口能效。通过波束的设计与控制降低系统能耗是系统节能的重要方式，未来也会有更多的创新性的节能方案出现。

极致节能技术通过亚帧静默、通道静默、浅层休眠和深度休眠等实现不同级别的节能措施也是典型的节能方式。在亚帧或通道级别进行静默处理，或者在深度休眠模式下完全关闭基站，达到极致休眠，控制基站在极低负载时的功耗，实现能耗与业务负载的最佳匹配。同时通过公共信号轻量化设计，保障基本业务体验不受影响。

宽频 / 多频多模合一技术也在持续发展。提升设备集成度，大幅减少设备部署数量，简化部署方式，在降低系统成本的同时可以有效降低能耗。其他例如高效功放技术结合数字预失真 (DPD) 技术提高线性度，可以显著提升功放的输出功率和效率；恒效功放技术大幅降低中低负载能耗，解决功耗与业务流量的非线性问题，显著降低在无用户或者少量用户时基站的静态功耗问题。这些技术都是进一步提升设备效率降低能耗的有效方式。

新材料、新工艺和新能源的应用对于无线设备节能发挥基础作用。先进制程的芯片技术可以提升设备的运行效率，降低设备运行时的能耗。新型散热材料提高设备在高温环境下的稳定性，延长设备寿命，在设备全生命周期降低能源成本。新能源的利用也是绿色通信的一种有效方式，风能、叠光等清洁能源作为补充能源，可以降低对传统能源的依赖程度；基站储能技术可以利用电网峰谷用电差异，平衡不稳定时段，从而降低系统的电力运营成本。

二、网络级多维协同，配合极简部署促节能

5G 网络支持更加灵活的配置和部署，在频率、组网和业务应用等方面，可以采取多种协同技术手段，提升网络效率，降低网络能耗。

高低频协同方面，运营商拥有中、低、高不同的频率资源，可以通过频段之间的协同组网提升频率的利用效率。低频段可以用于覆盖和基本通信，而高频段则在用户密集区域或需要高带宽服务时使用，从而减少不必要的能量消耗。

宏微协同方面，宏基站覆盖范围广，但功耗较高；微基站则覆盖范围小，功耗相对较低。通过宏微协同，

可以在保证网络覆盖和质量的前提下，根据用户分布和业务需求灵活调整宏基站和微基站的工作状态。在用户密集区域，可以增加微基站的使用，减少宏基站的负载，从而降低网络整体能耗。

4/5G 协同方面，随着 5G 网络的逐步部署，4G 和 5G 网络将长期共存。通过 4/5G 协同，可以实现资源的最优分配和利用。对于低速率或覆盖需求，可以优先使用 4G 网络；而对于高速率和低时延需求，则使用 5G 网络。此外，通过共建共享基站资源，可以减少重复建设，降低能耗和成本。

在设备部署方面，极简部署方式逐渐成为趋势。通过机房集中化、基带池共享技术、站点室外化部署、一体化基站（BBU+RRU）等一系列措施，大

幅提升站点能效。减少空调使用并替换为液冷等高效散热技术的策略，可以进一步降低站点部署的运行和维护成本。

三、AI 技术赋能网络，节能与用户感知完美平衡

智能化节能技术是未来的主要发展趋势，通过 AI 技术赋能网络，进行精准的网络流量预测和业务识别，通过时间、频率、空间和功率域多维的节能措施，可以做到在保证网络服务质量的同时最大限度降低能耗，达到“功随业动”的极致目标。

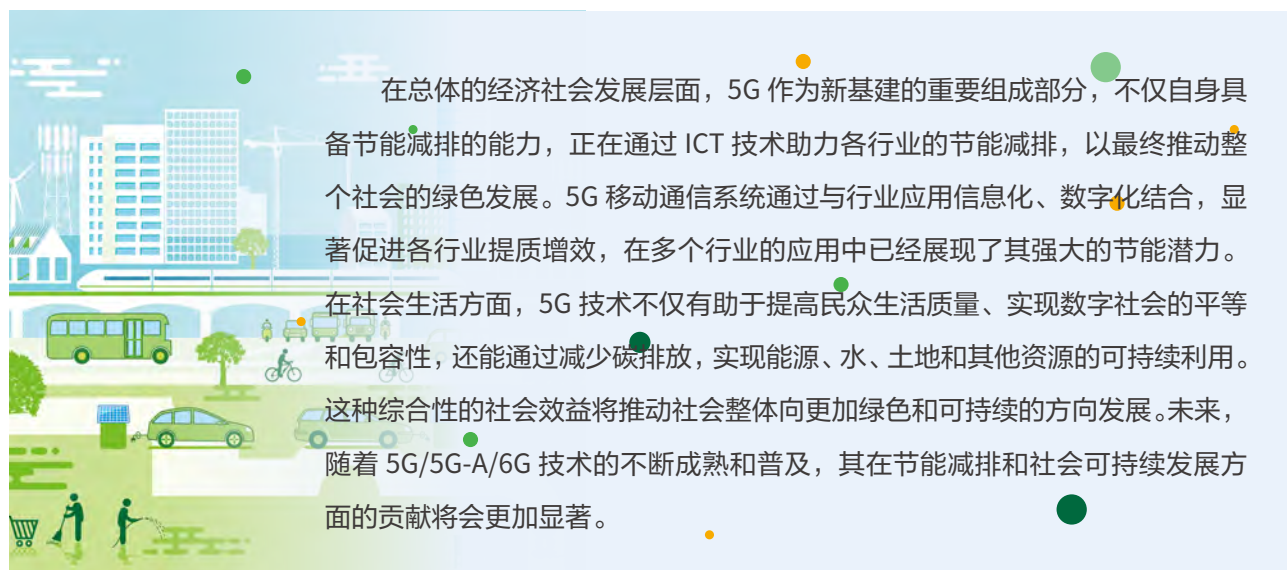
时域节能，智能化技术可以更精准的预测网络业务量的潮汐效应，在网络负载量低的情况下，让小区和通道休眠更加及时准确；频域节能，智能化技术可以基于业务流量更加精准的动态自适应关停部分载波或调整收发带宽；空域节能，通过智能化技术，基站可以根据负载与干扰情况自适应调整发送单元和天线波束，以实现网络节能；在功率域，通过智能化技术优化基站的资源配置，动态调整发送信道的发射功率，同时保证覆盖范围和业务感知等不受影响。

通过智能化技术，对用户业务的快速识别和业

务质量评价，可以进一步实现在发射带宽和发射通道在符号级时间粒度的节能控制，达到极致节能。

从网络层面，结合 AI 和大数据技术，通过分析用户行为和业务流量，预测不同时间段和区域的业务需求，在单站节能基础上，通过多站协作，根据流量负载和业务质量要求，智能化实现高低频协同、宏微协同、4/5G 协同，同时保证节能和网络性能的平衡。智能化无线基站节能系统，利用 AI 和大数据技术自动制定最优机房供电策略，并结合远程智能控制技术，实现站点能耗的精细化管理。

5G 移动通信网络在绿色节能方面的新趋势涵盖了新架构的研发与部署、新功能的研究和开发，以及新材料、新工艺、新能源的引入等多个层次和方向的创新。未来，随着这些技术趋势的深入实现和广泛应用，网络能耗将大幅降低，通信网络整体的能效将得到进一步提高。



通信感知一体化 支撑多场景多业务泛在应用

通信感知一体化（Integrated Sensing And Communication，简称 ISAC）是将通信系统和感知系统融合，可以极大提升无线系统能力、丰富业务种类，提升频谱利用效率和硬件利用效率，成为 5G-A 研究的重点技术，也是 6G 移动通信系统关键的新能力之一。感知聚焦通过无线信号，获得目标定位（测距、测速、测角）、成像、检测、识别和跟踪等能力。

5G-A 和 6G 通信感知一体化研究的重点是主动式感知，通过网络自发自收等多种方式实现对无源目标的感知。通信感知一体化系统在低空、近海管控、河道航运等领域有比较明确的应用需求。通感融合雷达、摄像头、超声波、各种传感器等多种感知数据也是未来演进的重要方向。

5G 系统通过交互式感知，支持目标对象的高精度定位和跟踪，尤其室内 GNSS 无法应用的场景，同时提供了高速无线通信业务和低成本、高精度的室内定位，实现通信感知一体化，已经进入到规模应用推广阶段。



一、通感融合有效支撑低空经济发展，探索多种应用领域

近年来无人机等低空飞行设备发展迅速，在视频拍摄、农林测绘、智慧农业、空中运输等领域发挥了重要作用，比如无人机针对偏远山区的物资运输、针对喜马拉雅等极恶劣环境、垂直落差大情况下的高山物资输送，大大缓解了传统人力运输带来的成本高、风险极大、时间长、效率低问题。我国低空经济呈现良好的发展势头，形成了以低空飞行器为主体，带动低空通信、监管、低空运输等相关的低空产业链，预计将形成千亿级产业链，成为我国新的经济增长点。

低空经济既需要低空通信网络支持低空节点与平台的信息传输，也需要感知网络识别出低空飞行物的距离、角度、速度、形状等信息，并有效管理，形成一套高效、低成本的低空管控系统。此外，随着低空飞行器的快速发展，无人机乱飞现象严重，对于国防安全和人民的正常生活造成很大威胁。为防止无人机“黑飞”造成的安全问题，可依赖通感

网络的感知能力进行监测，并对管控区中的“黑飞”目标预警。相对于部署高成本的雷达网络进行监控，复用通信系统设计和硬件资源的通感一体网络是更为经济有效的技术手段。

通感一体化设备同时具备通信和感知能力，基于密集分布的通信基站站点部署通感一体化设备，很好地匹配低空的通信和感知需求，提升了频谱利用效率和硬件利用效率。系统设备可以利用相同的频谱、硬件提供感知服务，感知结果也可用于辅助通信接入或管理，提高通信服务质量和通信效率，实现通信与感知功能相互增强。

感知能力极大提升了无线网络的业务能力、扩大了应用领域。通感一体网络不仅可以服务低空领域的安防需求，还可以应用到近海领域的监控，面向行业的感知场景也是通感一体化的价值领域：包括智能制造领域中的位置感知、缺陷检测、无人监控、环境重构、数字孪生等，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、健康监测等。

从国际、国内通感融合的标准进展看，整体上还处于技术研究阶段。目前国内已经在进行通感融

合系统技术验证，2024年运营商联合设备商开启了通感融合基站的小规模网络试验。通过试验网技术验证，可推动通感一体化技术和设备的成熟，助力低空领域应用规模发展。

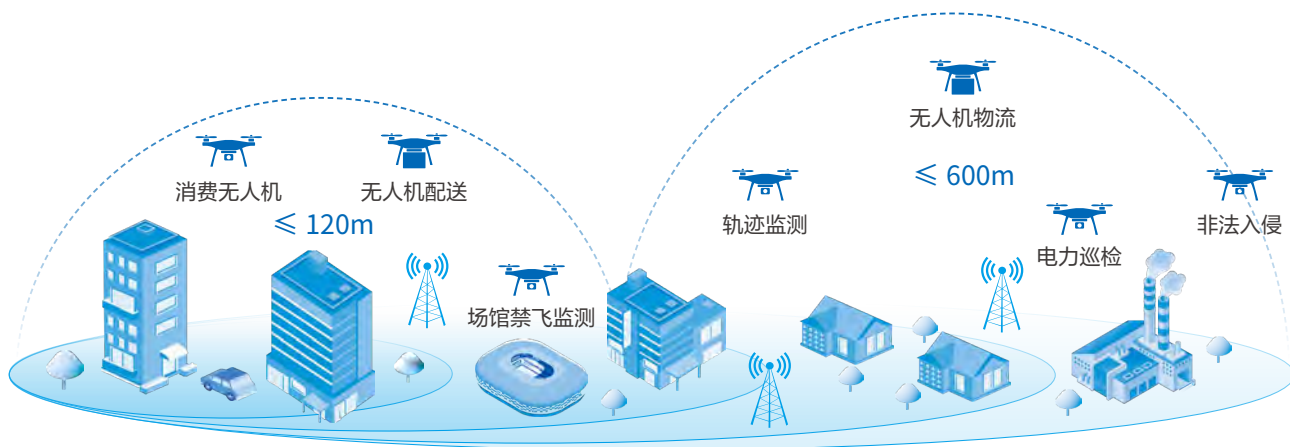


图 9-1: 低空通信感知一体应用示意图

二、通感融合向多模态融合方向发展，规模应用还面临着诸多挑战

感知原理与通信原理不同、设计目标不同、性能评价指标存在差异。在有限的无线资源条件下，要实现通信感知一体化，需要根据通信需求、感知功能和精度需求，从底层帧结构将这两种功能有机地融合在一起，通过时分复用、频分复用、空分复用等多种方案实现通信和感知的并存和资源协同，在减少干扰的同时，达到通信能力和感知能力的均衡。

目前基站自发自收是主流的感知模式，基站通过分析反射信号的变化，实现对感知目标距离、角度、速度、形状等信息的探测。由于基站需要对接收到的反射信号进行时域、频域、位置生成、点迹融合等多维度处理，数据量大、计算复杂度高，需要平台能力的提升。通感与 AI 融合形成通感算一体化平台是技术发展趋势，基于感知数据的智能分析，提供更实时、更高精度的感知服务能力。

多模态感知数据融合是融合多种感知数据，

主要包括无线信号以及来自雷达、摄像头、超声波、各种传感器的信息等。利用不同技术的特点和各自优势，通过数据融合算法，可以提升感知精度，避免单一感知技术的局限性，扩大感知应用场景。

通信感知融合也存在着不少挑战。通信和感知需要共享无线资源，如何综合考虑感知能力、通信速率、网络成本等因素，提供灵活的帧结构和系统配置，以实现通信感知资源的动态均衡，还有待 5G-A 和 6G 技术和标准的进一步研究和验证。多站点协同的网络感知可以提高感知精度，但多站点之间存在发送和接收信号不同步问题，对感知精度有很大影响，对站间同步校准技术提出了挑战；高精度感知和高识别成功率需要高复杂度的算法，面临算力的挑战。同时，高精度和实时感知也对通感系统的处理能力和传输带宽提出了新要求，间接对系统功耗和成本提出了挑战。这些挑战是通感一体化未来的重要研究方向。

三、5G交互式感知，提供高速无线通信和低成本室内定位业务

获取目标设备的位置信息是基础感知需求，定位也是目前各种智能应用最重要需求之一，各种业务应用都希望获取终端位置。

我国已经全面建设了以北斗为主导的卫星定位导航体系。室外已经形成了网络辅助的北斗定位系统，通过北斗差分技术可以提供厘米级高精度定位，开展了车道级导航等高精度位置应用。但在室内、隧道等遮挡环境下，难以接收卫星信号，导致定位盲区。而在车站、机场等交通枢纽的密集人员的室内场景，存在着非常迫切的定位需求，需要快速准确的导航服务。目前室内通常采用WIFI、蓝牙、UWB等多种定位技术，但这些技术存在定位准确性低、成本高、复杂度高、体制不统一等各方面的问題，例如UWB的部署成本高，WIFI、蓝牙通常采用指纹场景定位，需随着室内部署变化重新进行指纹场景扫描，既增加了定位成本，也存在定位准确性问題。如何解决室内场景的低成本、高精度定位需求，成为突破室内定位应用的关键。

5G标准从Rel-16到Rel-18都对室内定位提出了目标。综合来看，5G室内商用场景中置信度达到90%的情况下，定位目标精度为1米。应用的终端类型包括普通终端和RedCap终端，该要求可以满足大部分的应用需求。5G/5G-A系统通过网络与终端交互方式实现对位置的感知，目前多采用UL-TDOA的网络侧感知终端位置，降低对终端的改动。

UL-TDOA定位不需要依赖指纹场强扫描，避免了室内部署变化对定位的影响，UL-TDOA融合陀螺仪等传感器数据可以进一步提高定位精度，满足大量室内商业场景的米级、亚米级定位精度需求。5G室内定位融合北斗定位可以实现室内外融合定位。通过部署多通道picoRRU天线拉远可以降低室内picoRRU数量，提高定位精度，降低成本。目前5G无线定位已经逐步进入到规模应用推广阶段，通过部署一套系统，在满足高速无线通信业务的同时提供低成本、高精度的室内定位业务，实现通信感知一体化。



安全、可信、隐私保护 构筑5G-A/6G网络的安全基石

10

随着 5G-A/6G 业务场景的持续拓展和关键技术的不断演进，网络安全面临的挑战日益严峻。未来移动通信网络不仅提供连接服务，还将向用户提供多种业务，如感知服务、AI 服务等，同时行业应用的多样性带来了安全需求的多样化。随着云化、服务化以及边缘计算节点的引入，使通信基础设施、网络以及用户数据面临前所未有的安全挑战。例如网络智能运维可以智能管理维护网络，但针对其发起的攻击可能导致更为严重且难以察觉的网络安全隐患。沉浸式业务的提升在带来更佳用户体验的同时，也对数据的安全传输和隐私保护提出了更为严格的要求。天地一体化网络的构建，特别是卫星网络的引入，也带来了全新的安全挑战。

传统的网络安全防护主要以静态、被动的边缘安全防护体系为主，难以抵御未知攻击。因此，网络安全需要与时俱进，逐步融入新型安全技术和理念，以应对新型业务场景和关键技术所带来的安全挑战。网络通过加强身份管理和设备可信、采取有效的隐私保护措施、强化数据安全和隐私保护、加强网络智能化安全的建设等，为网络与数据安全筑起坚实的防线，确保 5G-A/6G 网络能够安全、稳定地运行。

一、提升身份可信和网络可信，构筑网络安全防线

网络的快速发展演进在为我们带来前所未有的连接速度和业务扩展能力的同时，也对网络安全提出了更高的挑战。

由于业务的多样性和网络的开放性，用户身份信息成为网络访问和控制的关键要素。身份可信机制能够确保只有经过合法认证的用户才能接入网络，防止身份伪造和未授权访问，从而保障用户隐私和数据安全。网络可通过对地理位置、用户偏好、终端状态和网络上下文等场景信息的实时感知和分析，针对服务对象和场景动态选取不同的安全策略进行资源配置，提供差异化网络安全服务。同时，可信的网络设备是网络和应用安全可靠运行的基石，通过内建可信免疫机制，采用主动方式保证网络和服务正常运行，网络设备通过内置安全功能，保护设

备自身安全或提供网络安全功能，以便在网络中形成一个自带安全能力的防护体系。

可信计算、零信任网络等新的网络安全技术手段为网络安全能力的进一步提升提供了新的选择，是未来演进的重要趋势。可信计算技术能够确保计算过程和结果的可信性，而零信任网络则要求对网络中的每个设备和用户都进行严格的身份验证和访问控制，通过持续验证和细粒度的访问控制，加强对未知攻击的防御能力。同时 3GPP 定义的 AKMA (Authentication and Key Management for Applications, 应用认证和密钥管理) 机制面向多样化垂直应用，提供终端用户和 5G 垂直应用服务商之间的互信，并建立安全的通信隧道。

二、隐私保护和数据安全是网络健康发展的核心要素

5G-A/6G 网络将连接更多设备，产生更多数据。这些数据可能包含用户的个人信息、位置信息、通信记录等敏感信息。大规模数据的收集增加了用户隐私泄露的风险。因此，5G-A/6G 网络需要采取有效的隐私保护措施，如数据脱敏、差分隐私等技术，确保用户数据的安全性和隐私性。5G-A/6G 网络支持边缘计算，将计算和存储功能移到网络边缘设备上。虽然提高了响应速度和数据处理效率，但也带来了数据安全性和隐私保护的新挑战。边缘计算平台需要具备防御攻击的能力，保证数据的机密性和完整性。同时，建立边缘设备与云端之间的安全通信机制、边缘设备的安全认证及防篡改机制，防止数据泄露和攻击。

网络在赋能垂直行业的同时，加速了数据从终

端、运营商网络、企业网络和应用的流转，数据安全治理重点将由原来静态的数据存储系统防护转变为动态的数据流动全生命周期风险管控。由于垂直行业对安全的需求和监管要求各不相同，不同的安全等级保护策略也需要相应调整。对于高安全等级的行业，如金融和医疗保健，其安全需求更加严格。这些行业处理着大量的敏感数据，包括个人身份信息、财务记录和病患数据。因此网络需要具备更高的安全要求，如端到端的加密、身份认证和访问控制等。

5G-A/6G 网络需要根据行业需求和监管要求确定不同的安全等级保护。不同的安全等级对网络提出不同的安全要求，包括加密、身份认证、访问控制、防止干扰等。这些安全措施将确保垂直行业在 5G-A/6G 中能够安全地开展业务。



图10-1: 5G-A/6G网络数据及隐私保护需求

三、AI与安全相互赋能，驱动安全智能发展

人工智能技术在 5G-A/6G 网络中的应用增强了网络的智能分析能力，提高了业务编排能力，降低了网络运维成本，通过将人工智能与通信网络进行深度融合，实现了网络智能化的有效落地。同时，网络智能化也会带来新的安全风险，攻击者可能利用人工智能技术，例如通过恶意机器学习、算法漏洞、模型偏差、甚至生成更加智能的恶意代码等手段进行自动化和精准的安全攻击。

因此，移动通信网络需要应对网络智能化系统自身的安全，加强对 AI 技术本身的安全性评估和监管，防止其成为攻击目标或被滥用，确保其在各种场景下都能稳定且安全地运行。例如，加强数据安全防护，实施数据加密和匿名化处理，保护敏感数据的安全性和隐私性；定期进行数据备份和恢复，防止数据丢失或损坏；加强数据访问权限控制，确保只有授权人员能够访问敏感数据。针对 NWDAF 在收集网络数据时存在的数据泄露和篡改风险，

NWDAF 与 UE/ 网元对接时所在的网络要支持双向认证，同时确保 NWDAF 在接收和传输 UE 数据时可以获得对应的授权。

同时移动通信网络可以利用人工智能技术进行自动化安全防御，在网络安全智能化分析过程中，可利用 NWDAF 采集的大量网络数据和流量强化网络安全自动化分析。如基于从 UE/ 网元获取的网络数据进行 DDoS 攻击分析，核心网中的网元与 UE 结合，以收集相关数据作为输入，并将异常外部事件警报作为输出提供给网管或其他网元，从而对网络攻击风险进行缓解。也可对异常网元行为进行检测分析和告警，包括网元内部配置错误分析、网元数据泄露分析等，利用网络分析功能监控所有网元的行为并确保其行为符合定义，并在网元发生异常行为时进行告警，通过威胁情报共享和多方协同防御机制，实现安全风险的实时监测和快速响应，提升网络安全防护的动态性和有效性。