

5G-Advanced 技术及应用



5G-Advanced Technology and Applications

王伟/WANG Wei, 张诗壮/ZHANG Shizhuang,
李晓帆/LI Xiaofan, 芮华/RUI Hua

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240723.1539.004.html>

网络出版日期: 2024-07-24

收稿日期: 2024-06-07

摘要: 提出了5G-Advanced 技术的总体愿景目标、主要演进方向以及六大应用场景, 包括无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力, 并详细阐述了场景需求和关键技术。无缝万兆进一步提升网络速率和降低时延, 全域通感将通信与感知功能结合, 拓展无线网络边界, 泛在智能通过AI赋能提升网络智能化水平, 空天地一体实现星地融合, 千亿物联支持高中低速全场景的物联接入, 确定能力满足工业生产的高要求。5G-Advanced 技术将持续提升5G网络能力, 拓展应用场景, 引领行业走向6G。

关键词: 5G-Advanced; 全域通感; 空天地一体; 千亿物联

Abstract: The overall vision goals, main evolution directions, and six major application scenarios of 5G-Advanced technology have been proposed, including seamless 10 gigabit network, integrated sensing and communication, ubiquitous intelligence, space-air-ground integration, 100 billion-level internet of things (IoT), and deterministic capabilities. It has also elaborated on the scenario demands and key technologies. The seamless 10 gigabit network aims to enhance the network speed and reduce network latency. The integrated sensing and communication combines communication with sensing functions to expand the boundaries of wireless networks. The ubiquitous intelligence improves the level of network intelligence through AI. The space-air-ground integration realizes the integration of satellites and ground networks. The 100 billion-level IoT supports IoT access in all scenarios with high, medium, and low speeds. The deterministic capabilities meet the high requirements of industrial production. 5G-Advanced technology will continue to enhance the capabilities of 5G networks, expand application scenarios, and lead the industry towards 6G.

Keywords: 5G-Advanced; integrated sensing and communication; space-air-ground integrated network; 100 billion-level IoT

引用格式: 王伟, 张诗壮, 李晓帆, 等. 5G-Advanced 技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 69-76. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

Citation: WANG W, ZHANG S Z, LI X F, et al. 5G-Advanced technology and applications [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 69-76. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

1 5G 技术演进及驱动力

5G 技术以其高速率、低时延、大连接能力成为推动全球通信网络迈向新纪元的关键力量。5G 技术的成功部署不仅加快了个人消费数字化的步伐, 更为工业互联网、智慧城市等领域的深度融合提供了坚实的支撑。然而, 5G 网络 and 产业发展还存在不足: 首先 5G 网络的覆盖范围和密度仍显不足, 且复杂的网络架构导致运维成本和能耗较高; 其次, 在技术层面 5G 亟需在工业控制领域实现突破, 以满足自动化和智能制造对高上行带宽、确定性时延的严格要求; 最后, 应用生态仍需完善, 在消费者领域具有广泛影响力的应用还不够多, 市场上仍缺乏能够引发生活方式变革的标志性应用。在工业领域, 5G 模组和终端的成本相对较高, 限制了大规模部署物联网设备的经济效益。同时, 海量的物联网设备对网络容量和连接密度提出更高的要求。因此, 5G 网

络需要向 5G-Advanced 演进, 通过技术创新和成本控制以应对产业发展的挑战, 在技术成熟度, 国土覆盖、成本能效、应用生态等方面进一步完善。

2024 年 6 月, 3GPP R18 标准的冻结是 5G 技术演进的一个关键里程碑。R18 版本重点增强了移动宽带网络: 一是多天线技术的演进^[1], 引入了高精度预编码, 增加正交解调参考信号 (DMRS) 端口数, 采用高分辨率天线等; 二是多载波技术的增强^[2], 如多频带单载波 (MB-SC)、灵活频谱接入 (FSA) 和动态频谱共享 (DSS); 三是毫米波通信的增强和扩展现实 (XR) 应用的优化^[3], 如分层服务质量和帧完整性传输保障等; 四是超可靠低延迟通信 (URLLC) 的增强, 包括灵活双工、确定性低时延和上行链路增强。同时 R18 也增强了 RedCap 设备以支持更广泛的物联网 (IoT) 应用^[4]。此外 R18 还关注了网络节能、智能中继器、NR sidelink 技术、移

动集成接入和回程技术 (Mobile IAB)、空口人工智能 (AI) 等关键技术, 以满足更加多样化的业务需求^[5]。预计到2025年6月, R18的关键技术将首次商用。在这之前, 基于私有实现的部分关键技术将持续展开落地验证, 如图1所示。

3GPP R19将在R18基础上进一步探索新的业务场景和需求, 这包括非地面网络 (NTN) 空天地一体、通感一体、无源物联网、URLLC 高精度授时以及内生 AI 技术。未来5G-Advanced将为5G发展注入新活力, 推动5G网络向更高性能、更智能化和更灵活的方向发展, 筑牢6G发展根基。

2 5G-Advanced 总体愿景目标及关键技术

5G-Advanced的演进应以场景价值为核心驱动力, 通过技术创新和网络能力的提升, 满足不同领域的需求, 推动社会经济的数字化转型。5G-Advanced的新阶段将对5G最初定义的三大场景eMBB、mMTC和URLLC进行增强, 基于无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力六大场景进行技术能力演进, 如图2所示。

在消费者领域, 5G-Advanced通过无缝万兆和泛在智能增强网络性能, 提升大众数智生活体验; 在企业的领域, 通过确定能力增强核心生产域业务的网络能力, 深入赋能数智行业; 在新经济领域, 通过拓展空天地一体、全域通感、千亿物联等能力支撑星网、低空、物联等业务, 助力构建数智社会。5G-Advanced的总体愿景目标是构建一个集“无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力”于一体的先进网络, 进一步增强网络和终端的技术能力, 支撑数字、智慧、绿色低碳社会基础设施的构建。5G-Advanced六大方向的特性、关键技术以及应用场景如表1所示。

2.1 无缝万兆: 极致性能新标杆, 超高速率、超低时延的极致体验

2.1.1 场景需求

5G-Advanced时代裸眼3D、云电脑、XR元宇宙、超高

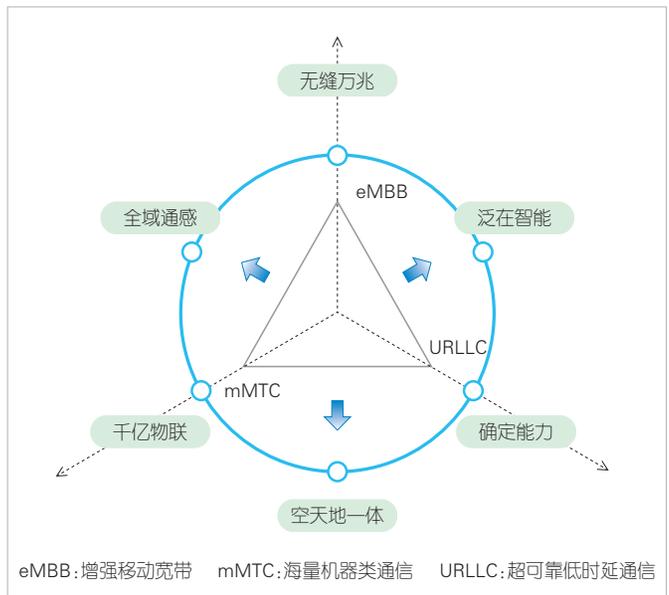
清直播、5G机器视觉等新业务形态的兴起, 驱动5G网络从千兆迈向万兆, 移动网络需要提供匹配的毫秒级时延下的无缝万兆体验。随着终端技术的持续突破和内容的加速繁荣, 预计未来沉浸交互业务的在线用户将相比现在增长100倍。用户对高质量服务体验的追求, 将推动5G-Advanced网络实现更高的网络性能, 以便为各行各业的数字化转型提供强有力的网络支撑。

2.1.2 关键技术

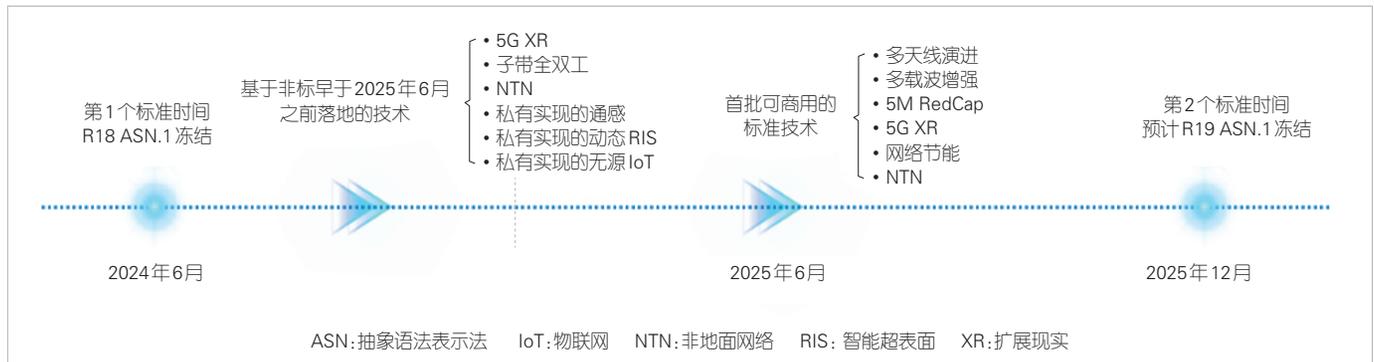
为了实现超高的数据传输速率和超低时延, 5G-Advanced需要在频谱利用、大规模天线、灵活时隙等方面实现技术增强。

1) 灵活带宽技术

频谱资源是无线通信系统的根基, 而全频谱重构将成为5G-Advanced网络持续演进发展的基础。主要表现在: 一是大带宽能力, 在6 GHz和毫米波频段推进单载波400 MHz以



▲图2 5G-Advanced六大场景



▲图1 5G-Advanced标准及关键技术演进

▼表1 5G-Advanced 关键技术及应用场景

场景	目标或特性	关键技术	应用
无缝万兆	提供超过万兆比特每秒的无缝数据传输速率,实现高速率、低延迟的通信体验	灵活带宽技术、多天线增强技术、灵活时隙技术	XR元宇宙、超高清直播
全域通感	实现通信感知一体化的多功能网络,增强环境监测、智能交通等应用的能力	全双工、干扰消除、通信和感知波形及信号处理一体化	车流检测、低空无人机监管、海域船只监管、呼吸心跳检测
泛在智能	将智能算法和决策能力嵌入到网络的各个层面,提升网络的自适应性、自动化和智能化水平	内生智能、行业大模型	智能节能、自动化运维
空天地一体	构建空中、地面和海洋等全覆盖的一体化通信网络	星上载荷、空口协议、星间网络拓扑	智能手机和物联终端直连卫星
千亿物联	支持全场景、全类型的物联网设备,满足物联网千亿级别规模部署的需求	能力裁剪、Ambient IoT 极致降低连接成本	自动化盘点、游牧跟踪、资产跟踪
确定能力	提供确定性网络能力,确保工业核心生产毫秒级低时延、99.999% 高可靠的性能要求	TSC、DetNet、URLLC、5G LAN、确定性闭环保障体系	工业自动化生产、远程医疗、金融交易

DetNet:确定性网络
LAN:局域网

TSC:时间敏感通信
URLLC:超可靠低延迟通信

XR:扩展现实

上,工作带宽1 GHz以上的演进,以持续提升宽带能力,尤其是毫米波的频谱资源非常充裕,可提供数十甚至上百倍于传统无线通信频段的可用带宽,支持超高速率数据传输;二是频谱的资源池组化,通过高中低频资源的高效协同、按需接入,实现跨频段资源的池组化管理,基于载波聚合技术(CA),深度协同高低频多载波能力,将多个分量载波聚合起来获得更大带宽,进一步提升用户感知体验。

2) 多天线增强

多天线技术特别是超大规模天线阵列(ELAA)显著扩大了天线阵列的规模^[6],包含数百甚至上千个天线振子,形成了超大规模MIMO系统,其具备更强大的波束赋形能力,可以生成更窄、更精确的波束,提供更高的空间分辨率和更高的分集增益。这有利于在密集用户环境中实现更精准的用户定位和服务,减少干扰,并能够实现更广泛的覆盖。同时通过动态波束控制,ELAA可以更灵活地调整覆盖范围和方向,适应快速变化的网络需求,支持更高频率(如毫米波和太赫兹频段)的高效利用,以满足超高数据速率、极低时延的需求。

3) 灵活时隙技术

5G TDD系统是上下行子帧时分配系统,存在上下行子帧配比不平衡问题,很难同时满足超低时延和上行高速率的要求。这对5G系统支持需要极致体验的某些工业场景提出了挑战。灵活时隙技术包括灵活频谱接入(FSA)和子带全双工(SBFD)技术,通过时隙级和子带级的动态资源分配优化了频谱利用率,提升了用户上行体验,降低了时延,是实现更高上行数据传输速率和更广泛5G-Advanced应用场景的关键技术。

FSA技术支持多个频段的上行发送,允许将不同的频段

资源进行自由拆分和组合,并且可以智能地在多个载波之间进行选择 and 切换,以避免拥塞和干扰。通过在时隙维度动态切换不同的上行频段,FSA技术能够显著改善用户的上行体验。SBFD技术则通过在同一频段内的不同子带上同时进行上行和下行的数据传输^[7],实现了真正的全双工通信,其支持在同一频段内多个子带的分割,分别用于上下行通信,并采用先进的射频硬件和信号处理技术,有效管理和消除自干扰。此时,网络能够根据实时通信需求,动态分配子带资源,尤其适用于对时延敏感的应用场景。FSA技术和SBFD技术为5G网络的上行链路提供了更多的性能提升空间,在需要大上行带宽和低时延的工业互联网和高清视频传输场景中具有重要应用潜力。

2.2 全域通感:通感算智新架构,扩展无线网络新边界

2.2.1 场景需求

通信感知一体化(ISAC)技术将蜂窝移动通信与感知功能相结合,赋予通信基站如同雷达般的探测与跟踪能力。在5G-Advanced阶段利用毫米波和太赫兹等高频段资源,可以实现更高精度、更高分辨率的感知能力,为各行各业开启了前所未有的应用前景,在交通领域,ISAC技术可以实时监测车道流量、车速和潜在道路危险,提升交通监管能力和安全性。在低空领域,ISAC技术实现了无人机的有效监管和低空安全的管理。在生活场景中,ISAC技术使得呼吸监测、手势识别等感知服务成为现实。在网络管理方面,ISAC技术通过感知所提供的高精度定位、成像和环境重构能力实现“感知辅助通信”,推动智慧网络的建设。在5G-Advanced时代,基于海量基站的通感算智融合基础设施将

实现全域通感覆盖，拓宽无线网络的边界，为消费者和各行各业带来创新服务。

2.2.2 关键技术

通信感知一体化通过空口及协议联合设计、软硬件设备共享，在相同频谱资源下实现通信功能与感知功能的融合共生，为提升频谱利用率和设备复用率带来一个全新的维度。感知与通信从松耦合到完全一体化将经历3个阶段：

第1阶段，实现通信与感知共享硬件和频谱，降低硬件部署的成本。系统采用双功能收发机，基于线性调频（LFM）和正交频分复用（OFDM）波形，以时分方式发送感知和通信信号。但通信和感知在评估指标和算法上的差异对硬件设计提出了挑战。一方面，传统有源天线单元（AAU）的收发未隔离，工作在半双工的状态下，而感知信号通常需要处于自发自收的全双工状态，会存在强自干扰。因此，合理的射频架构和有效的自干扰消除设计是ISAC系统亟待解决的关键技术难题^[8]。另一方面，感知需要累积相干信号，但通信的AAU由于收发切换等非理想因素，不同时隙发送的LFM信号相位是非相干的，该非相关相位不影响距离估计，但会影响速度估计的相干累积，因此感知系统对于采样抖动、频率偏移和相位噪声更为敏感。这对ISAC系统硬件同步和可靠性提出了更高的要求。

第2阶段，实现波形和信号处理一体化。通过融合通信和感知的信息采集、传输、处理流程，实现了对时域、频域、空域波形和信号处理技术的统一设计，同时为感知和通信两个功能服务。传统通信和感知波形在实现双功能时存在不足，通信信号的随机性与感知信号的确定性，使得传统通信信号难以满足高精度感知要求。同样地，将信息嵌入雷达波形进行通信也受到脉冲重复周期的限制，无法满足高速传输需求。因此，设计一体化波形需综合考虑通信和感知的功能需求与性能指标，以实现高速率传输与高精度感知，同时消除干扰。例如通感联合一体化波形OFDM-Chirp就是一种典型的设计，通过频分复用将通信和感知数据分别调制到奇数子载波和偶数子载波上，确保信号互不干扰，同时保留通信信号的数据携带能力和LFM信号的低峰均比、低旁瓣特性^[9]。这一设计为同时实现高精度感知和高效率通信提供了有效方案。

第3阶段，实现跨层、跨模块、跨节点的深度融合，以及通信与感知的完全一体化。将感知功能融入通信网络将形成大规模通感协同网络，实现感知能力与通信能力的融合共生。一方面，多ISAC基站将协同工作，通过不同方位的观测获取目标多维信息，提升感知灵敏度，并扩大感知范围，

实现感知连续覆盖。另一方面，基站间可共享感知数据，通过对无线环境的感知与识别实现更精确的定位、更高效的频谱利用和更强的信号覆盖。未来多目标的实时感知、目标识别和复杂的通感数据交互处理，将对系统架构设计和算力需求提出挑战。系统将集成通信、感知、计算和智能功能，形成深度融合的通感算智超级无线基础设施平台^[10]。

2.3 泛在智能：引领通信智能化变革，赋能绿色高效运维

2.3.1 场景需求

随着5G网络规模不断扩大，业务场景日益丰富，使得网络功能和管理变得愈加复杂。当前网络面临的挑战主要包括：业务需求的多样化与传统网络策略之间的不匹配、基站能耗的精细化管理难题、海量关键性能指标(KPI)的及时处理以及网络隐患的智能识别等，这些挑战推动了无线网络智能化的不断演进，亟需智能决策和自动化技术来提升网络运维的效率。

2.3.2 关键技术

在5G-Advanced时代，泛在智能聚焦于三大核心能力：一是支撑业务智能化运营，通过内生智能提高网络通信性能和用户体验；二是通过智能节能技术促进绿色可持续发展，减少运营成本；三是实现网络部署运维的高度自动化。

1) 业务智营

3GPP R17和R18持续扩展了网络数据分析功能(NWDAF)^[11]。作为核心网智能化的核心网元，NWDAF通过数据采集、AI/ML模型训练和分析推理，对网络的上下行带宽、时延、抖动等多维度指标进行综合分析，并精准识别用户业务状态，进而启用相应的网络侧保障机制，确保用户体验的持续优化。此外，随着R19版本的推进，核心网和RAN的联合智能化将成为研究重点，进一步提升网络的整体性能和用户体验^[12]。

2) 智能节能

基于AI业务场景的深度识别，通过对历史话务数据、节能策略、配置信息数据训练分析，一站一策地生成小区级节能策略，实现符号关断、通道关断、小区关断、深度休眠、自动启停等多种节能功能在网络中的深度部署^[13]，实现低负荷时最低能耗，高负荷时最高能效，为能效优化场景赋能，提升系统的自智能力

3) 智能运维

大模型驱动的智能运维技术为网络运维带来了革命性的变化，利用通信级行业语料增强的电信行业大模型能够理解并处理大量的网络日志、告警信息、配置文件等文本数据，

快速识别网络故障，预测性能瓶颈，提供优化建议^[14]。此外，大模型还能协助生成和解释复杂的网络配置指令，简化网络管理过程，甚至自动编写修复脚本，显著提升网络运维的效率和准确性^[15]。

AI技术的集成和大模型的爆发式发展对算力的需求提出了前所未有的挑战。将计算能力与网络技术深度融合，实现计算资源与网络资源的统一管理和优化调度，构建算网一体新型基础设施，是5G-Advanced演进中不可或缺的一环。算网一体还能够支持新兴的业务应用，如XR、云游戏等，对于提升通信服务智能化水平具有重要意义。

2.4 空地一体：星地融合，泛在连接

2.4.1 场景需求

全球通信地面网络已取得显著成就，但海域和偏远地区的仍面临覆盖难题。卫星通信以其独特的覆盖优势，成为打破僵局的关键技术。众多领军企业如SpaceX、AST SpaceMobile和OneWeb等正积极研究卫星通信技术。然而，现有卫星通信方式存在局限性，专用卫星电话的庞大终端和高昂成本限制了其普及。非地面网络（NTN）将卫星的覆盖优势与移动通信标准融合，实现空天海地无处不在的连接，让智能手机和物联网终端可以直接连接卫星，支撑应急通信、广域物联等应用，开启“消费级”卫星通信时代。

2.4.2 关键技术

5G NTN技术的主要目标是实现地面与卫星通信网络的融合，形成统一的空口传输标准和组网架构，并通过IoT NTN和NR NTN两个技术方向分别满足广域物联和无缝宽带服务的需求，提供无处不在的网络连接。这涉及硬件设备、空口技术、网络技术等多个层面的关键挑战，如图3所示。



▲图3 非地面网络(NTN)关键技术挑战

5G-Advanced阶段将持续探索创新性的解决方案来克服这些挑战，最终实现5G通信系统对空天海地多场景的统一。

1) 硬件关键挑战

由于卫星距离地面较远，信号在传输过程中会产生较大的路径损耗。对于轨道高度确定的卫星，其最大传输距离也可以确定。例如，低地球轨道（LEO）卫星不同频率下自由空间路径损耗范围约为141.4~165.9 dB，而地球静止轨道（GEO）卫星路径损耗则高达191 dB^[6]。为了弥补这种损耗，射频器件需要配备更高发射功率的天线和达到更高的增益。但是提高天线增益通常需要增加天线的尺寸，提高发射功率也会引起高能耗和散热问题。这对移动终端是一个挑战，要求终端天线和射频器件能够在低功率下实现有效的信号接收和发射。这意味着射频器件在设计和制造过程中会变得更加精细和复杂。

3GPP定义了透明转发和星上再生两种模式。透明转发模式下，卫星仅对接收信号进行简单的放大，并完成波束控制和频率转换，处理流程简单，成本较低，但地面站的位置和数量会影响覆盖范围。星上再生模式需要复杂的星上处理^[17]，主要包括星载收发机和相控阵天线两大关键部分。其中，星载收发机完成射频中频处理、基带调制解调以及链路层协议处理；相控阵天线则实现快速波束成形和灵活的波束管理，利用高增益的多点波束来有效降低干扰，提高通信容量和覆盖范围。星上载荷在宇航空间环境中必须承受发射震动的考验，还需要抵抗在轨辐照、真空及高低温循环交变。传统宇航级器件不仅价格高昂、制作周期长，而且技术水平往往落后于商用现货(COTS)器件。因此，在采用严格的可靠性保障措施的基础上，将地面商用现货器件应用于空间环境，将为卫星互联网提供低成本且可持续的运营支持^[18]。

2) 空口关键挑战

对于GEO卫星，其轨道高度为35 786 km，单向信号传输时延至少需要119 ms，而600 km的LEO透明转发时延达到14.2 ms^[19]。由此可见，超有时延对5G系统的定时关系提出了挑战。此外，低轨卫星的高速运动将引起多普勒和定时变化，终端将经历几万赫兹甚至兆赫兹级别的多普勒频移^[20]，严重影响帧同步。因此，时频率的同步补偿将是星地空口融合传输技术的重中之重。

3GPP标准针对NTN系统的超有时延和超高频偏问题，提出了一系列针对性的解决方案，涉及上行时间提前量（TA）调整、混合自动重传请求（HARQ）进程管理、增强的频率补偿等多个方面。具体包括：1) 上行时间提前量（TA）调整，配置全球导航卫星系统（GNSS）的设备可以利用卫星的已知轨道参数和UE的位置信息，预测信号传播

的时间，并据此调整TA。方案同时引入上行时间同步参考点，基站可以指定用户设备补偿包括终端到卫星的服务链路和卫星到地面网关的馈电链路在内的所有时延，或者仅补偿服务链路时延。此外，为了补偿LEO移动引起的大定时漂移，基站可以向终端广播定时漂移信息^[21]。2) 引入可容忍时延的HARQ重传机制，支持动态调整HARQ超时时间，并引入处理长延迟的时序偏移，扩展物理下行共享信道(PDSCH)到HARQ的反馈时延以及上行调度到物理上行共享信道(PUSCH)传输时延；将HARQ进程数量扩展至16或32个，以确保任意时刻都有足够的HARQ进程可用，在UE缓存能力受限的情况下，可以关闭HARQ功能。此外，方案还引入预先确认机制。基站在发送数据之前，先发送一个预先确认信号给终端，以缩短终端等待确认的时间。3) 实现增强的频率补偿，网络侧进行波束专用的公共频偏预补偿，UE利用位置信息、星历信息以及下行参考信息做频偏估计，并在UE侧完成上行专用频偏补偿。

3) 网络关键挑战

星间组网面临着多项挑战，其中星间拓扑和路由尤为关键。卫星在轨道上的高速移动会导致网络拓扑结构频繁变化，因此路由算法需要具备高度的动态性和自适应性，以确保数据包的可靠传输。同时为了满足全球无缝覆盖的通信需求，卫星网络的拓扑结构需要具有足够的冗余和连通性，以满足不同地区的通信需求。此外还需要建立高速可靠的星间通信链路，解决星间链路的建立、切换和故障恢复等问题。与传统的射频通信相比，激光通信具有更高的带宽、更低的功耗和更强的抗干扰能力，是实现星间高速数据传输和可靠连接的关键技术方案。

2.5 千亿物联：高中低速全场景应联尽联

2.5.1 场景需求

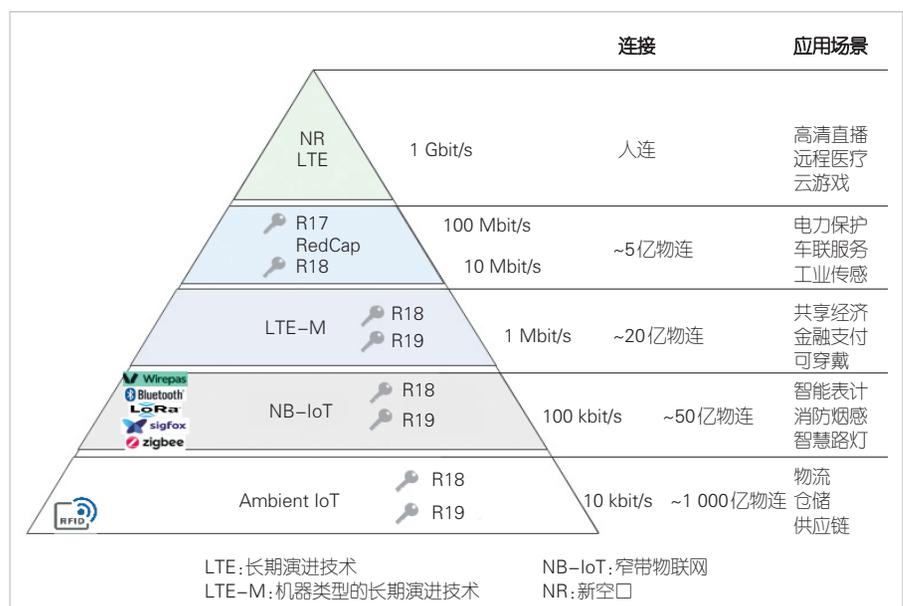
万物互联需要不同速率等级的物联技术，只有全场景、全类型的物联能力才能满足全行业的数智化转型需求，如图4所示。目前基本形成了窄带物联网(NB-IoT)、4G和5G多网协同发展的格局。5G-Advanced新引入了RedCap技术和无源物联网技术。其中，RedCap适配中高速物联需求，应用于工业传感、视频监控、可穿戴设备等领域^[22]；无源物联网则凭借其无需供电和极低成本的特异性，开启一个千亿连接的新时代。

它支持自动化货物读取和追踪及仓储管理等。5G-Advanced的全面布局将进一步促进高中低速全场景应联尽联。

2.5.2 关键技术

RedCap与无源物联网作为未来物联发展的双引擎，分别针对不同场景展开广泛应用。其中RedCap是为了支持中高速物联网(IoT)场景而设计的^[23]，其包括3个核心特性：一是低成本与低功耗设计，减少终端所需带宽和天线数量，优化数据传输机制减少不必要的网络交互，简化终端复杂度，在保持通信效率的同时显著降低能耗；二是继承5G网络的大带宽与低时延网络切片等核心特性，虽然简化了能力，但仍具备高速数据传输和实时响应的能力；三是与5G系统共存兼容，简化网络部署，实现平滑升级与互操作性。RedCap技术通过其成本效益、低功耗、继承5G核心特性和灵活的网络配置等关键特性^[24]，为中高速物联场景提供了一个高效、经济的解决方案，推动了5G网络在物联网领域的广泛应用。

环境物联网(Ambient IoT)是一种极低成本物联网技术，可以从环境中提取能量，并将其转换为可用的电能以支持设备的运行^[25]。3GPP划分了3种能力的无源标签：Device A完全依赖散射通信，无能量储存能力，无独立信号生成能力，功耗小于1 μW或小于10 μW；Device B完全依赖散射通信，有储能能力和信号放大能力，但无独立信号生成能力，功耗约为100 μW；Device C有储能能力和独立信号生成能力，复杂度比NB-IoT低很多，功耗约为1~10 mW^[26]。针对传统射频识别(RFID)面临的挑战，Ambient IoT设计



▲图4 全场景全类型物联技术

基本原则是在不显著增加标签的成本、功耗、复杂度、体积的基础上,增加通信距离,降低读写器间干扰,支持低成本大规模组网,支持对标签的高精度定位。Ambient IoT关键技术包括:

1) 极简空口与信令设计:超低复杂度波形和调制,超低功耗、低复杂度前向纠错码,极简标签协议栈,必选信令仅有数十条,复杂度相比NB-IoT终端大幅简化,可支持蜂窝网空口数据收发。

2) 联合干扰抑制,提升通信距离:通过站间资源协同与联合调度优化,规避读写器间干扰,设计集中式收发与分布式激励,降低读写器激励信号对接收器的自干扰,同时借鉴蜂窝通信的多天线波束赋形、正交载波和编码等技术,提升接收灵敏度。

3) 蜂窝无源物联网架构设计: Ambient IoT设备支持局域网和广域网,需要设计端到端的网络架构,拓展蜂窝系统支持无源物联能力,实现广域标签定位与传感信息采集。目前3GPP Study Item阶段Ambient IoT就连接拓扑和频谱方面已达成了初步共识。

2.6 确定能力:确定性网络助力工业核心生产

2.6.1 场景需求

5G技术在工业核心生产流程的深入应用,对网络的确定性能力需求日益增长。工业领域需要低时延、低抖动和高可靠性的网络服务,传统的“尽力而为”网络服务模式已无法满足这些苛刻的需求。因此,行业迫切需要一种具备确定能力的5G-Advanced网络技术,提供毫秒级低时延、99.999%高可靠及微秒级抖动的极致确定性能力。

2.6.2 关键技术

5G在确定性网络技术上的演进分为3个发展阶段:阶段1聚焦5G与工业时间敏感网络(TSN)的融合(R16引入)。5G TSN在园区范围内,协助移动化终端接入工业TSN,使终端摆脱线缆束缚,实现灵活移动^[27];阶段2聚焦5G网络支持时间敏感通信(TSC)技术(R17引入)。TSC技术通过强化5G网络的时间同步精度、数据包传输的确定性等,使得5G无须依赖外部TSN即可构建独立的确定性服务专网,从而简化部署流程^[28]。阶段3聚焦5G与确定性网络(Det-Net)技术的集成(R18引入),实现广域范围内的确定性数据传输保证。集成DetNet后,5G工业专网不仅能够实现本地高效协同,还能与全球范围内的工业网络无缝对接,促进产业链上下游的紧密合作^[29]。除了TSN、TSC、DetNet这三项

核心技术外,构建全面的5G确定性网络还需整合多种通信技术,如URLLC、5G局域网(5G LAN)、网络切片、服务质量(QoS)保障机制,以及承载层的Flex-E、专线、多协议标签交换流量工程(MPLS TE)、Ipv6段路由(SRv6)等技术。这些技术的融合与协同是构建端到端确定性服务的基础。

5G-Advanced的网络将形成服务等级协议(SLA)确定性闭环保障体系^[30],即通过5G-Advanced网络对业务特征的智能感知,跨网络域协同调度保障、低时延高可靠的空口传输技术、SLA度量反馈可以形成闭环的保障体系。首先SAL业务保障平台自动识别业务流特征,然后基于匹配业务及网络特征完成RAN+核心网的联合编排与智能调度,通过灵活带宽配置适配业务带宽需求,通过灵活时隙配置降低业务时延,并通过保守调度和冗余传输机制来提供高可靠的数据传输能力。最后系统进行SLA测量反馈,包括用户体验数据速率、端到端时延、包可靠性等精确的度量指标。网络根据测量结果进行闭环调整。这种确定性闭环保障体系,在引入闭环反馈机制后,避免了传统“切片+5G服务质量标识符(5QI)”静态配置方式中的资源浪费,以最少的网络资源满足不同业务的差异化体验需求,实现业务体验及网络资源效率的双优。

3 结束语

作为5G到6G承上启下的关键阶段,5G-Advanced将在现有5G成果的基础上,基于无缝万兆、全域通感、空天地一体、泛在智能、千亿物联、确定能力六大场景,持续提升能力。同时,5G-A的六大场景也将平滑地衔接6G网络,为6G网络打下坚实基础,为构建一个更加智能、高效、互联的未来社会提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] CHEN W S, LIN X Q, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1592-1619. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3274037
- [2] LIN X Q. An overview of 5G advanced evolution in 3GPP release 18 [J]. IEEE communications standards standards magazine, 2022, 6(3): 77-83. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200001
- [3] GAPEYENKO M, PETROV V, PARIS S, et al. Standardization of extended reality (XR) over 5G and 5G-advanced 3GPP new radio [J]. IEEE network, 2023, 37(4): 22-28. DOI: 10.1109/MNET.003.2300062
- [4] CHEN W S, MONTORO J, LEE J, et al. The standardization of 5G-advanced in 3GPP [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(11): 98-104. DOI: 10.1109/MCOM.005.2200074
- [5] CHEN W, JAIN P. 3GPP release 18 overview: a world of 5G-advanced [Z]. 2023
- [6] WANG C, LI C, ZHONG Z M, et al. Characteristics of 5.3 GHz MIMO

- channels with an extremely large antenna array in urban macro scenarios [C]//Proceedings of IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). IEEE, 2022: 1-5. DOI: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860785
- [7] WEI X G, LI J, LIANG C L, et al. Performance analysis of subband full duplex for 5G-advanced and 6G networks through simulations and field tests [J]. IEEE open journal of the communications society, 2023, 4: 2451-2467. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3322592
- [8] 李萍, 郭晓江. 通感一体化关键技术与应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 72-78. DOI: 10.12142/ZTETJ.202302014
- [9] 陈大伟, 向际鹰, 陈诗军, 等. 5G-A 通感一体化的场景、挑战及关键技术 [J]. 邮电设计技术, 2022, (8): 23-8
- [10] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式 [J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37-48. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022039
- [11] HE X W, YANG Z M, XIANG Y, et al. NWDFA in 3GPP 5G advanced: a survey [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). IEEE, 2023. DOI: 10.1109/eiecs59936.2023.10435433
- [12] 李爱华, 吴晓波, 陈超, 等. 5G 网络大数据智能分析技术 [J]. 电信科学, 2022, 38(8): 129-139. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022052
- [13] BHAT Z A, SOFI I B, MASOODI I S. Smart energy-saving solutions based on artificial intelligence and other emerging technologies for 5G wireless and beyond networks communications [M]//Energy Systems in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 77-95. DOI: 10.1007/978-981-99-8771-9_5
- [14] NIKBAKHT R, BENZAGHTA M, GERACI G. TSpec-LLM: an open-source dataset for LLM understanding of 3GPP specifications [J]. arXiv e-prints, 2024: arXiv: 2406.01768. DOI: 10.48550/arXiv.2406.01768
- [15] ZHOU H, HU C M, YUAN Y, et al. Large language model (LLM) for telecommunications: a comprehensive survey on principles, key techniques, and opportunities [EB/OL]. [2024-06-15]. <http://arxiv.org/abs/2405.10825>
- [16] 李文娜. 小卫星通信系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012
- [17] SAAD M M, TARIQ M A, KHAN M T R, et al. Non-terrestrial networks: an overview of 3GPP release 17 & 18 [J]. IEEE Internet of Things magazine, 2024, 7(1): 20-26. DOI: 10.1109/IOTM.001.2300154
- [18] 曹舟. 采用 COTS 器件的低轨星载收发信机设计与实现 [J]. 电讯技术, 2020, 60(8): 890-895. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2020.08.005
- [19] 廖德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术研究及演进展望 [J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022056
- [20] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望 [J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36
- [21] 叶向阳, 单单, 韩春娜, 等. 5G NTN 定时提前调整策略分析 [J]. 邮电设计技术, 2023(9): 58-62. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.09.011
- [22] VARSIER N, DUFRÈNE L A, DUMAY M, et al. A 5G new radio for balanced and mixed IoT use cases: challenges and key enablers in FR1 band [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(4): 82-87. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000660
- [23] ANBALAGAN S N, CHIUMENTO A, HAVINGA P. Fine grained vs coarse grained channel quality prediction: a 5G-RedCap perspective for industrial IoT networks [C]//Proceedings of IEEE 20th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, 2024: 1-7. DOI: 10.1109/WFCS60972.2024.10540787
- [24] VEEDU S N K, MOZAFFARI M, HÖGLUND A, et al. Toward smaller and lower-cost 5G devices with longer battery life: an overview of 3GPP release 17 RedCap [J]. IEEE communications standards magazine, 2022, 6(3): 84-90. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200029
- [25] BUTT M M, MANGALVEDHE N R, PRATAS N K, et al. Ambient IoT: a missing link in 3GPP IoT devices landscape [J]. IEEE Internet of Things magazine, 2024, 7(2): 85-92. DOI: 10.1109/IOTM.001.2300198
- [26] 黄伟, 谭俊杰, 简荣灵, 等. 面向蜂窝化的反向散射通信综述: 关键技术与标准化研究 [J]. 移动通信, 2023, 47(8): 46-59. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230623-0002
- [27] 张强, 王卫斌, 陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 21-26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202006006
- [28] MANNWEILER C, GAJIC B, ROST P, et al. Reliable and deterministic mobile communications for industry 4.0: key challenges and solutions for the integration of the 3GPP 5G system with IEEE [C]//Proceedings of Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium. VDE, 2019: 1-6
- [29] ABUIBAID M, GHORAB A, SARUHAN A A, et al. Integration of DetNet/TSN reliability functions in 5G systems: a case study and measurements [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2023: 369-375. DOI: 10.1109/CSCN60443.2023.10453205
- [30] 中兴通讯. 5G 工业现场网白皮书 [R]. 2023

作者简介



王伟, 中兴通讯股份有限公司无线产品资深专家; 主要研究方向为无源物联网、非地面网络、智能超表面、太赫兹等, 以及相关技术的原型系统研发。



张诗壮, 中兴通讯股份有限公司无线研究院副院长; 主要研究方向为 5G/6G 应用场景和系统架构设计。



李晓帆, 中兴通讯股份有限公司无线算法资深专家; 主要研究方向为 5G-A 及 6G 关键技术, 涵盖通信感知一体化、人工智能增强的无线通信、无线网络数字孪生等。



芮华, 中兴通讯股份有限公司算法预研资深专家、6G 智能与未来科技实验室负责人; 主要研究领域为数字孪生、AI-RAN、通信大模型、毫米波通感一体、下一代卫星网络、无源物联网等。