

6G 未来可期

©紫光展锐（上海）科技有限公司 版权所有

6G 白皮书

紫光展锐

2023 年 9 月

目录

目录	I
1 前言	1
2 6G 趋势、应用场景与需求	3
2.1 6G 趋势	3
2.2 6G 应用场景	4
2.3 6G 需求	6
2.3.1 6G 系统性能指标	6
2.3.2 6G 半导体技术需求与发展	10
3 6G 网络架构	15
3.1 6G 网络设计概述	15
3.2 天地一体化网络	16
3.3 以用户为中心网络	17
3.4 服务化网络	19
3.5 算力网络	20
3.6 通感融合网络	22
3.7 安全可信网络	23
4 6G 核心技术	25
4.1 增强 MIMO 技术	25
4.2 全双工技术	28
4.3 先进调制技术	31
4.4 太赫兹通信技术	35
4.5 非正交接入技术	38
4.6 终端直连技术	41

4.7	低功耗通信技术	44
4.8	通感一体化技术	49
4.9	AI 辅助通信技术	52
4.10	星地协同传输技术	56
4.11	以用户为中心的接入技术	59
4.12	物理层安全技术	60
5	6G 发展的几点思考	65
6	参考文献	69

1 前言

自 2019 年 5G 蜂窝技术正式商用以来，5G 网络建设如火如荼，多种形态的终端和应用层出不穷，5G 技术也从最初的 R15 版本演进到 5G-Advanced 阶段的 R18 版本。与此同时，第一届 6G 无线技术峰会召开，国内外相继成立多个重要的 6G 组织，相应的研究工作在 6G 全球范围内拉开帷幕。紫光展锐携手业界合作伙伴展开了 6G 基础研究、核心关键技术攻关和标准化工作。2020 年 11 月 10 日，紫光展锐发布了第一版《6G：无界，有 AI》白皮书，预测未来 6G 将极大地打破传统信息交互的界限，突破信息触达的边界，实现智能化的无处不在。

近两年来，国际电联（ITU）相继发布了多项 6G 相关研究成果。2022 年 6 月，ITU 发布了面向 6G 的首份技术研究报告《未来技术趋势研究报告》，给出了 6G 主要技术引擎以及无线网络和无线空口的候选技术；2023 年 6 月 ITU 发布了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》，在升级 5G 三大应用场景的同时，扩展出三个跨领域场景，形成 6G 的六大应用场景，并相应提出了十五个关键能力指标，为后续 6G 标准化和产业发展指明了设计目标和发展大方向。

接下来的三至五年是识别明确 6G 技术的重要时期，行业将在技术验证和标准化等多个维度研究各类候选技术，性能优良、产业成熟的技术将脱颖而出。本白皮书从 ITU 的场景需求出发，给出 ITU 关键能力指标的定量判断和半导体技术需求，提出 6G 网络架构的六大技术特征：天地一体化、用户为中心、接入服务化、通算融合、通感融合、安全可信。然后从演进型和革命型两个角度对 6G 核心技术展开研究，包括频谱效率提升技术、超高频段技术、海量接入技术、跨领域技术、高层接入技术、安全技术。最后，给出我们对 6G 未来发展大方向的开放性问题的思考，供业界同仁一起思考。

2 6G 趋势、应用场景与需求

在需求和技术的双重驱动下，6G 不再只是通信技术的增强演进，而是通过通信技术与信息技术、数据技术、感知技术及人工智能（Artificial Intelligence, AI）等技术的深度融合，由移动通信网络发展为移动多维信息网络。未来 6G 网络不仅仅是一项赋能技术，更将作为一种具有广泛应用的社会基础设施而存在^[1]。

2.1 6G 趋势

普遍预计 2030 年以后，更多的消费者和更多用途的设备将以一种更加智慧的全新方式连接到信息网络中，地面无线网络、地面有线网络及卫星网络等深度融合，共同构成 6G 移动多维信息网络。此前，业界对于 6G 的典型特征已达成初步共识，提出了诸如泛在互联、多维感知、全域覆盖、绿色低碳、内生安全等典型特征^[2]，随着 ITU-R 的 6G 建议书^[3]的确定，6G 的设计原则如可持续性、安全性、隐私性、弹性、泛在化、智能化等被正式提出，从这些典型特征和设计原则可以预言 6G 将会是 5G 的一个进化体，继承发扬 5G 的优势，同时结合其他技术，打造出一个普适性的网络。

6G 可以在宏观和微观世界分别展开探索，实现宏观与微观的联接，可以模拟人类所有感官，提供给用户完全沉浸式的体验，实现虚拟与现实的融合，可以利用物理实体与数字模型实时互动、智慧推演，实现数字与物理的映射，还可以逼真地还原和呈现过去未来的事和物，实现过去与未来的穿越。



图 2-1 6G 服务升级

整体来说，在未来，6G 系统将在 AI、计算等新兴技术的加持下，伴随着传统无线技术

及网络技术的持续演进，赋能千行百业。

2.2 6G 应用场景

在 ITU-R 的 6G 建议书^[3]中，将 5G 的三大应用场景扩展为 6G 的六大应用场景，以实现全应用场景覆盖，除了对 5G 原有的应用场景继续增强和演进，包括沉浸式通信、极可靠低时延通信和大规模通信，还催生出全新的应用场景，包括感知通信一体化、AI 通信一体化和泛在连接，提升生产效率，提高生活品质。

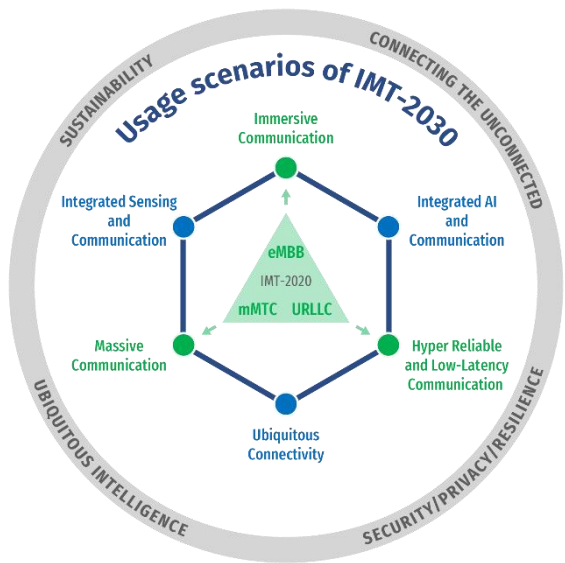


图 2-2 IMT-2030 应用场景^[3]

■ 沉浸式通信场景

沉浸式通信场景是 5G 增强移动宽带场景（eMBB）的扩展，主要涵盖了为用户提供高速率音视频交互式体验的用例，如沉浸式 XR 等。沉浸式通信场景最主要的能力增强是提高频谱效率和一致性服务体验，其中，在各种环境中把握更高的数据速率和移动性之间的平衡是至关重要的。

比如在沉浸式 XR 中，通过对视觉、听觉、触觉等感官信息的完全模拟和实时交互，可以给用户创造身临其境、感同身受的逼真体验。沉浸式 XR 对网络的需求主要体现在传输速率、时延和同步精度等方面。传输速率方面，沉浸式 XR 对下行速率有极高的要求，为了保证用户较为满意的体验效果，对传输速率的需求一般在 Gbps 量级，同时沉浸式 XR 对上行数据速率也有较高要求。

沉浸式 XR 对终端的要求较高，新型的 XR 终端需要满足轻质、高分辨率/高刷新率显示、高保真/3D 定位音频及真实触感反馈等要求，此外，还需在智能交互方面进行增强。

■ 极可靠低时延通信场景

极可靠低时延通信场景是 5G 超可靠低时延场景（URLLC）的扩展，主要涵盖了对可靠性和延时有更高需求的用例，在这些用例中，如果不能满足对应的需求，则可能会造成非常严重的后果，如工业控制等。极可靠低时延通信场景在提升可靠性和降低时延时，与具体用例、定位精度及连接密度等息息相关。

比如在工业控制中，为了实现完全自动化、精确控制和精准操作，对可靠性、时延及抖动都有严苛的要求。在传统的工业环境中，有线连接是常用手段，当 6G 能提供接近或媲美有线连接的体验后，可以在越来越多的环境中替代有线连接。

■ 大规模通信场景

大规模通信场景是 5G 大规模机器通信场景（mMTC）的扩展，主要涵盖了包含大量设备或传感器连接的用例，如智慧城市、智慧交通、物流、能源、环境监测等。大规模通信场景需要支持高连接密度，并且根据使用情况，对数据速率、功耗、移动性、覆盖范围以及安全性和可靠性也提出了不同的要求。

比如在数字孪生城市中，需要通过使用数字孪生技术，将整个城市映射到数字世界中，如物理世界中的水/电/燃气等资源供给系统，学校/医院/社区/道路等城市基础设施和实时的人群活动和事件等。数字孪生技术可以辅助城市管理者在问题发生之前，预测和防控可能發生的问题，也可以在问题发生后，迅速制定出最优的解决方案。

■ 泛在连接场景

泛在连接场景作为 6G 新提出的场景，需要为目前通信网络无覆盖或几乎无覆盖地区提供无差别的连接服务，特别是农村、偏远和人烟稀少的区域，以弥合数字鸿沟。泛在连接主要涵盖了物联网和移动宽带通信，特别是基于卫星的物联网和移动宽带通信。

比如借助卫星网络实现全球范围内尤其是海洋、荒漠等人迹罕至地区的全域无缝覆盖，是目前移动通信发展的重要方向。在 6G 时代，卫星通信和空间通信作为地面通信的补充，能够满足广域覆盖的要求，实现业务层面的互联互通。但是，面向未来广域智能连接与全球无缝宽带接入等迫切需求，在 AI 技术、云技术、卫星技术、运载技术等技术快速发展的驱动下，空间网络与地面网络需要从业务、体制、频谱、系统等不同层次进行融合，构建全域无缝覆盖通信系统，实现统一高效的资源调度与网络管控。

■ AI 通信一体化场景

AI 通信一体化场景作为 6G 新提出的场景，主要支持分布式计算和人工智能驱动的各种应用，如辅助自动驾驶、数字孪生等。AI 通信一体化除了对通信的要求外，还需要包括将

AI 和计算集成到 6G 中的一些新功能，如数据收集和处理、人工智能模型的训练、分发和推理等。

比如在辅助自动驾驶或完全自动驾驶中，主要依赖于车本身的单体智能和车联网技术构造的群体智能。自动驾驶是实现智能交通的重要手段，也是人们生活高度智能化程度的一个重要特征。

■ 通信感知一体化场景

通信感知一体化场景作为 6G 新提出的场景，主要涵盖了需要传感功能的新型应用，利用 6G 提供关于物体和连接设备的运动信息和周边环境信息，如活动检测、运动跟踪、环境监测等。通信感知一体化场景除了对通信的要求外，还需要高精度定位和传感相关能力的支持，包括距离/速度/角度估计、物体和存在检测、定位、成像和测绘。

2.3 6G 需求

随着 6G 应用场景的不断丰富，要在同一个网络系统中满足差异化的需求，对网络提出了极大的挑战。6G 网络从整体上需要能够按需提供服务，随时随地满足不同用户差异化的需求，即 6G 需要有以用户为中心的全域无缝覆盖和按需服务的能力。另外，6G 还需要做到灵活高效、智慧安全，节约部署和运营成本。

2.3.1 6G 系统性能指标

历史上每一次移动通信技术的更新换代，在关键性能指标上都会有十倍到百倍的提升，包括峰值速率、体验速率、网络容量、时延、可靠性、移动性、连接密度等等。6G 系统一方面需要满足某些特定场景下的极致需求，另一方面也要兼顾不同场景的多样化需求，保持可持续发展的道路。2023 年 6 月 ITU-R 发布了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[3]，在给出 6G 六大应用场景同时提出了十五个关键能力指标维度。关于以上谈到的两个方面，在 ITU 给出的十五个性能指标维度上均有所体现。

ITU-R 已经汇集产业各方力量正在制定详细的技术性能需求（Technical Performance Requirements, TPR），给出 6G 技术需要达到的最小能力指标取值。我们认为 6G 各种性能指标的最终取值需要综合考虑潜在的业务需求和技术可实现性，避免性能指标成为空中楼阁，没有实际落地可能。当前，5G 主要标准技术组织 3GPP（3rd Generation Partnership Project）正在制定 5G-Advanced 相关需求和技术，普遍认为 5G-Advanced 研究方向是未来 6G 的提前试水预热。因此，我们认为 6G 可以以 5G-Advanced 的性能指标^[4]为基准，针对不同场景、不同业务，会有更深入更有针对性的提升。紫光展锐在 ITU 已有指标取值建议范围的基础上做了适当的扩展补充，关于定量指标初步观点如图 2-3 所示，各项指标的取值分析和功能描

述将在下文说明。

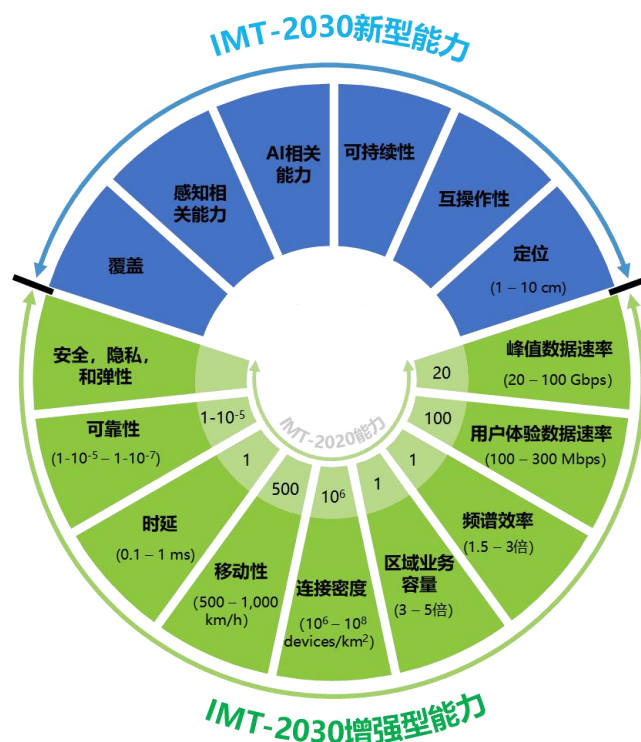


图 2-3 6G 能力指标预测（来自紫光展锐）

对于图 2-3 中的九大增强型能力指标分析如下：

- 1) 峰值速率：峰值速率主要与峰值频谱效率和带宽有关。5G 峰值频谱效率为下行 30 bps/Hz，上行 15 bps/Hz，该需求基于上下行采用 256QAM 调制方式、下行 8 流，上行 4 流数据传输，推算而来^[5]。从当前技术发展程度看，预计可以在调制阶数、空间流数等方面进一步增强，如调制方式从 256QAM 提升到 1024QAM，下行 8 流增加到下行 16 流，上行 4 流增加到上行 8 流，基于这样的假设，峰值频谱效率理论上可以提升至原来的 2.5 倍，即下行 75 bps/Hz，上行 37.5 bps/Hz。在带宽方面，我们认为在能够达到峰值频谱效率的中低频段带宽能力在 500 MHz-600 MHz 左右。在高频段，尤其是太赫兹频段，可用带宽会比中低频带宽更多，如增加到 2 GHz 左右，但其峰值频谱效率由于空间流数等因素的限制会下降到上述给出的峰值频谱效率的 1/3 到 1/2。理论上，6G 可以通过高中低频的聚合实现超高的峰值速率，如下行峰值速率达到 100 Gbps 左右，上行峰值速率达到 50 Gbps 左右。需要说明的是，实际商用系统的峰值速率并不一定能达到该峰值速率，其取值取决于各地区频谱规划和各频带实际频谱效率。
- 2) 用户体验速率：5G 针对密集城区的 eMBB 场景，其下行体验速率为 100 Mbps，6G 针对沉浸式通信场景，体验速率预计在 100 Mbps 以上，针对特殊的业务，可能会

达到 300/500 Mbps

- 3) 频谱效率：此处的频谱效率指的是小区级的平均频谱效率。6G 通过挖掘提升频谱效率的空口技术潜能，及采用先进的组网技术，预计其平均频谱效率相对于 5G 可提升 1.5~3 倍。
- 4) 区域业务容量：随着未来用户速率及连接密度的增加，6G 场景的区域网络容量相对于 5G 大约需要提升 3~5 倍。
- 5) 连接密度：相对于 5G，6G 的智能终端，尤其是智能物联网终端的数目将会大大增加。性能指标方面，单位面积或单位体积的设备数目预计可能会达到 5G 场景下的 100 倍。
- 6) 移动性：在 6G 时代，机载终端（Airborne Terminal）的应用会得到进一步普及。因此，6G 对移动性的要求也进一步提升，期望达到 500~1000km/h。
- 7) 时延：工业控制、自动驾驶等场景的进一步强化，对时延要求将达到新的高度。通过采用更大的子载波间隔或者采用更少的调度符号，可以减少单位传输时间间隔（Transmission Time Interval, TTI）的大小，另外也可以通过减少部分用户面或控制面流程，进一步缩短用户面或控制面时延。6G 空口时延相对于 5G 的毫秒级，会进一步下降至亚毫秒级，并且增加了对同步和时延抖动的要求。
- 8) 可靠性：在工业控制、自动驾驶等涉及到人身、财产安全的场景，人们的最终期望总是绝对可靠，然而从技术上实现绝对的可靠性难度极大，尤其是在考虑时延的需求的同时考虑可靠性，但基于一种普遍认知，99.999%~99.99999%的可靠性基本上可以满足绝大部分场景下达到人们的基本需求。
- 9) 安全、隐私、弹性：对个人及公共信息的机密性、完整性和可用性的保护，需要从多层次的安全技术手段、全方面的法律法规体系等方面共同发力，进一步保证 6G 的安全和隐私；在网络和系统在遭受自然或人为干扰期间和之后能够继续正常运行，是系统稳定性的重要标志之一，对于保护网络系统、关键基础设施、数据和应用程序至关重要，需要从软件到硬件，从规划到部署，全方面全流程进行保证。

以上性能指标均为移动通信网络基础能力指标，6G 作为新一代移动多维信息网络，在这些基础能力指标之上，还甄别和定义了六大新型指标：

1) 覆盖能力

在 ITU 建议书及报告中的覆盖能力指的是单小区的覆盖范围，可以通过小区边缘到小区中心的距离来表征。单小区的覆盖能力一般与载波频段、发送功率等因素直接相关，直接

影响网络部署方案与成本。此外，6G 覆盖能力也体现在整个 6G 网络的服务范围，即 6G 能否最大化地连接用户，朝着全球全域无缝覆盖迈进。卫星、高空平台等空天网络设备的引入为实现无缝覆盖提供了可能，6G 信息网络需要制定单星/单高空平台的覆盖能力，基于该能力确定整体星座的规划部署。

2) 感知相关能力

感知相关能力主要是针对 6G 移动多维信息网络基于无线信号获得关于环境或特定物体特性的信息（如形状、大小、方向、速度、位置、距离等）的能力，需要用新的能力指标进行表征。

预计 6G 的感知能力可以从感知置信度、估计精度、感知分辨率、漏检率和虚警率等维度进行评估。其中置信度表征感知结果的正确概率，一般要求在 95%以上；估计精度表征估计结果与真值之间的最小差异，对于定位的估计精度，可能达到分米级别，对于速度的估计精度，可能达到 0.1 m/s；感知分辨率表征感知结果的颗粒度，对于距离分辨率一般要求分米级别，对于速度分辨率，可能达到 0.1m/s；漏检率跟虚警率一般适用于有无的检测，一般需要低于 5%，在部分安全相关的场景中，可能需要在 1%以下。

3) AI 相关能力

AI 相关能力主要是针对 6G 移动多维信息网络内/外使能 AI 相关功能（分布式数据处理、分布式训练、AI 模型传输、AI 推理等）的能力，主要对端到端时延、体验数据速率和可靠性等提出要求。

面向不同应用的 AI 功能使能对网络性能的要求差异较大，以基于在线 AI 推理的实时多媒体编辑为例，其对与端到端时延的要求约为 1s，对下行体验数据速率的要求约为 512 Mbps，这些指标对于 6G 网络带来较大挑战。

4) 可持续性

达到可持续性发展需要整个 6G 网络设备在其生命周期内最大限度地减少温室气体的排放和其他对环境的影响。环境可持续性指标是个系统性指标，需要在 6G 设计、部署和运行中，尽可能地提高能源效率、最大限度地减少能源消耗和资源使用。其中能源效率是可持续性的一个可量化指标，预计相比于 5G，6G 的能量效率可能提升 2.5-5 倍。

5) 互操作性

互操作性是指系统内不同实体之间的可操作性，这种可操作性的实现需要在空口设计时考虑成员包容性和透明性。未来，除地面广域通信外，微域/短距通信、非地面通信等技术也都将是 6G 网络体系的一部分。当用户可以选择随时随地通过最合适的通信技术访问各种

服务时，用户体验可以得到增强，在 6G 设计时可以通过不同通信技术之间的互联互通来为用户提供改进的连接体验，包括根据服务和运营目标提供无处不在和连续性服务的选项。

6) 定位能力

随着 5G 的演进，对定位能力的需求越来越高。目前 5G 定位已持续演进了三个版本，第一个 5G 定位版本是 Rel-16 定位，该版本满足了 5G 定位的基本法规定位需求和商业场景下的定位，该版本定位精度要求相对不高。第二个定位版本的 Rel-17 定位，该版本主要针对商业应用和工业互联网场景，提高上述场景下的定位精度，对于商业场景，定位精度要求小于 1m，对于工业互联网场景，定位精度要求小于 20cm。第三个定位版本是 Rel-18 定位，该版本扩展了定位的场景和定位能力，其中定位场景扩展到辅链路定位，RedCap (Reduced capability, RedCap)定位和 LPHAP (Lower power high accuracy positioning, LPHAP) 定位。辅链路定位主要为了满足车联网、公共安全和工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIoT) 场景下的高精度定位需求，如在 IIoT 场景下对定位精度的一般要求为 1m 以内，而部分特殊业务，定位精度需要满足 20cm 的需求；RedCap 定位主要为了实现对 RedCap 终端的高精度定位，其定位需求需小于 1m；LPHAP 定位则是在高精度定位的同时，对电池寿命提出了要求，即 LPHAP 定位需要满足定位精度小于 1m 的同时，终端的电池寿命达 6-12 个月。

在 6G 中，定位的场景会进一步扩展，如自动驾驶、室内定位和导航、地下管道和线缆定位等，相应的，其定位能力也会进一步增强，如定位精度提升到 10cm 以下，使得 6G 可以为依赖定位技术的业务提供更准确可靠的解决方案，赋能更多行业。

2.3.2 6G 半导体技术需求与发展

6G 将构建一个 DOICT 融合、天地融合、虚实融合的全新生态，在该生态中，终端将呈现泛在化、智能化、融合化等趋势，并在通信、计算、存储、传感等功能上的要求更加丰富，同时与 AI、云、大数据等结合带来更多产业和社会价值，创建万物智联的时代。

摩尔定律自诞生之后，指引着芯片行业向既定目标前进，芯片行业的发展也促使摩尔定律调整和革新。新的 6G 系统对带宽、频率、功耗、集成度、多模化、智能化等方面提出了更高要求，6G 时代通信技术的发展高度依赖半导体技术的发展。在摩尔定律的放缓和 6G 系统全新能力要求的双重压力下，半导体技术将从新工艺、新材料、设计方法、新器件等方面为未来 6G 技术发展提供新的解决之道^[6]。

■ 新工艺、新材料

6G 时代数字逻辑芯片工艺将从 3nm 向着 1nm 甚至更低制程节点持续迈进，全环栅晶体管 (Gate all around Field Effect Transistors, GAA FET) 架构将成为延续现有半导体技术路线

的关键技术，叉型片场效应晶体管(Forksheet FET)和互补场效应晶体管(Complementary FET, CFET)等新型晶体管架构也将成为后续演进的重要技术候选。在晶体管架构演进的同时，材料创新也在同步发展，沟道材料将从 Si 演变为 SiGe、Ge 以及以 WuS₂、MoS₂ 等为代表的 2D 材料，接触模块将从硅化物演变为提供更低肖特基势垒高度 (Schottky Barrier Height, SBH) 的新型材料。此外，晶体管背面供电技术将在 2nm 及以下制程芯片中被采用，用于改善芯片功耗，帮助实现芯片制程持续微缩。

6G 高频段需求的引入带来工艺和材料的升级，导致了射频芯片/器件物理形态的变化，传统半导体材料和技术（如 Si/CMOS）无法在此类高频段中支持高数据速率通信，硅基 GaN 和硅基 InP 等 III/V 族化合物半导体工艺和 SiGe/RF-SOI（Silicon-On-Insulator，绝缘体上硅）等特色硅基工艺将有望成为下一代高容量无线通信应用的可行技术，以在高频率下提供所需的输出功率和效率，但还需要突破可靠性和材料堆叠设计等关键技术。与此同时，随着高频段下天线阵列尺寸的减少，融合硅基 III/V 射频前端器件和天线的 2.5D 或 3D 异构集成技术将成为关键技术选择。碳纳米管晶体管等新材料晶体管技术也将成为 6G 太赫兹频段器件和电路的潜在解决方案。

■ 新架构

系统级芯片（System on Chip, SoC）方案将具有不同架构和不同指令集的 IP 核实现系统集成，并随着制程持续微缩以不断增强性能、优化功耗和尺寸。移动终端 SOC 芯片中关键组成如中央处理器（Central Processing Unit, CPU）和图形处理器（Graphics Processing Unit, GPU）、图像信号处理器（Image Signal Processing, ISP）等性能及其所集成的核数量不断提升。通信处理器所需处理器核如协议处理器、物理层控制器等的数量也都会随着系统带宽提升而进一步提升，带来更复杂的任务分配、调度设计。随着 AI 在终端侧的不断渗透，专用神经网络处理器（Neural Network Processing, NPU）将成为下一代终端 SOC 的重要组成。当前 NPU 架构尚处于百花齐放阶段，未来会收敛到几种典型方案，包括上层各种多媒体应用及物理层信号处理领域等。

系统级封装（System in Package, SiP）将数字和非数字器件、硅和非硅材料、CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor，互补金属氧化物半导体）和非 CMOS 器件以及光电、MEMS（Micro-Electro Mechanical System，微机电系统）等不同集成电路工艺制造的芯片和器件集成封装在一起，完成子系统或系统，在不单纯依赖半导体工艺情况下，提高集成度，能够解决异质集成和 Chiplet 问题，从超越摩尔发展方向进行系统集成方式创新。结合穿硅孔互连技术（Through-Silicon Via, TSV）和键合/互联的 3D 芯片堆叠技术将成为扩大芯片容量、提升传输带宽，降低数据传输能量损耗的关键技术。

高频段系统的射频前端将延续 AiP（Antenna in Package），AoB（Antenna on Board）等

集成一体化架构。随着频段进一步提升带来天线单元尺寸的降低，AoC（Antenna on Chip）在毫米波高频段、太赫兹系统中将会逐渐应用。另外，全双工、通感一体化等技术会改变射频前端收发一体或复用的架构，收发分离解耦设计将会出现。

光子和电子的协同设计将变得更加关键，基于 SOI/SiGe 工艺的光子器件、光器件和 CMOS 处理的单片集成、新的片上组件（例如激光源和光学锁相环）将成为 6G 领域关键技术，可用于太赫兹超高速接口和卫星通信放大器等。硅光器件将从异质材料集成向单片集成演进，通过将更加复杂而离散的光学功能集成到一颗硅基芯片中，可实现如激光雷达等设备的高集成、低成本和小型化。硅光工艺有机结合微电子和光电子技术，在优化芯片尺寸、成本、功耗的同时实现可靠性提升，成为“超越摩尔”的新技术路径。

■ 存储技术

6G 场景中更高清视频、XR、AI、自动驾驶等应用会对存储器带宽、容量、功耗等多方面产生影响。存储器将采用新材料、新器件等技术以持续向制程微缩与立体堆叠方向发展，同时新兴存储器类型也在不断出现，在读写速度、容量、功耗上不断提升和优化。

DRAM（Dynamic Random Access Memory，动态随机存储器）仍将以制程持续微缩为主，但未来也将朝着立体堆叠的方向并进发展。在制程方面，DRAM 利用铁电材料等新材料代替传统高 k 介质，并结合先进的极紫外（EUV）光刻技术等将有助于进一步延续尺寸微缩，预计到 2030 年 DRAM 将进入 10nm 以下节点；在结构上，采用氧化物薄膜晶体管作为选通管将有望实现 3D DRAM，并进一步向 GAA 演进。NAND Flash 将持续通过 3D 堆叠增加闪存单元层数以及增加闪存单元存储位数来增强性能，预测到 2030 年 NAND Flash 技术将有望达到 1000 层，但在堆叠高度限制下，2030 年后可能会出现立体堆叠与制程微缩并进的技术路径，以此缩小 NAND Flash 体积。

6G 时代应用场景的不断变化对数据存储的速度、功耗、容量、可靠性等层面提出了更高要求，存储器技术也在不断地面临着新的挑战，以高带宽内存（High Bandwidth Memory, HBM）、铁电随机存取存储器（Ferroelectric RAM, FRAM）、相变存储器（Phase Change RAM, PCM）、电阻式记忆存储器（Resistive Random Access Memory, ReRAM）、磁性随机存储器（Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM）等为代表的新型存储器能够带来独特性能优势，有望实现对 DRAM 和 NAND 的潜在替代，但目前还受到材料和制造工艺的发展水平制约。

新型存储器的发展和 AI 广泛应用的需求推动了存内计算（存算一体）技术的发展，其突破了冯·诺依曼架构限制^[7]，在计算性能、可扩展性和分析复杂度方面进行了改进，用于解决处理器和存储器分离带来的数据传输延迟和损耗问题。基于存内计算的 AI 加速芯片和带有计算功能的存储器将有望在 6G 时代数据密集型计算处理方面迎来突破性发展和应用。

■ MEMS 器件

6G 时代智能消费电子和可穿戴设备对感官、声、光等的智能化泛在感知需求、工业和家庭中自动化的日益普及以及极低功耗通信所需的环境能量采集将推动 MEMS 器件步入新的发展阶段。MEMS 作为微电路和微机械按功能要求的芯片集成，基于光刻、腐蚀等传统半导体技术，融入超精密机械加工，并结合力学、化学、光学等技术，使得一个毫米或微米级的 MEMS 具备精确而完整的机械、化学、光学等特性结构。MEMS 器件的未来发展将依赖于新材料、3D 集成和先进封装技术的共同推动，如氮化铝、锆钛酸铅等压电新材料将用来提升 MEMS 器件增强灵敏度和降低能耗，3D 集成和先进封装将有助于异质异构集成以进一步实现小型化。

■ 复杂工况性能保障

6G 空天地一体互联协同需要芯片具备在多种复杂工况下的性能保障。在用户段，终端芯片在满足高性能异构计算处理外，还需要采用融合 CMOS、SiGe 以及 SOI 工艺的相控阵射频芯片；在空间段，星载处理器需要高抗辐射、高性能的宇航级芯片，对可靠性要求极高，需要具备高冗余/高纠错能力架构。

自动驾驶作为未来十年的重要应用场景，在车载终端芯片上，在考虑性能、功耗和成本之前，需要首先保障芯片在恶劣工况下的可靠性、长效性以及功能安全，对封装和散热工艺处理能力要求较高，同时需要加强在工程质控管理和协同设计流程方面的管控。

3 6G 网络架构

3.1 6G 网络设计概述

5G 网络提供传统的通信服务，5G 网络由接入网、核心网和承载网组成，整体网络架构相对固化。而 6G 网络将是具备泛在化、智能化、安全性、弹性、持续性等特点的移动多维信息网络^[3]。其中，泛在化，是指提供全域泛在链接、泛在服务。智能化，具备内生智能。安全性，具备架构级的内生安全可信。弹性，网络能按需定制、资源灵活部署。持续性，绿色低碳。为满足 6G 网络的设计需求，6G 网络架构可采用服务为中心的分层网络架构设计：从上到下依次为服务层、网络功能层和网络资源层。其中，服务层提供 6G 网络为各种应用所提供的服务，包含通信、感知、AI、算力、安全等服务；网络功能层根据服务层的服务需求，进行编排和调用，以及与网络资源层进行交互，提供连接管理、数据转发、安全保障、算力管理等网络功能；网络资源层为 6G 网络中的基础资源池，包含通信资源、感知资源、计算资源、存储资源等，为上层提供所需的网络资源。

按照上述的 6G 网络的需求和架构设计思想，6G 网络引入的关键技术包含：

- 1) 天地一体化网络：6G 网络将从地面延伸到太空，建立天地全空间的统一网络架构，提供全域下各类用户的无线宽带接入，实现统一高效的资源调度和网络管控。
- 2) 以用户为中心的网络：改变传统的以网络为中心、用户接入网络的方式，建立以用户需求为中心、用户专属定制的服务网络，并支持多类型网络接入方式。
- 3) 服务化网络：将网络解耦为不同的网络功能，按需调配网络功能，灵活的支持不同服务，增加网络柔性，提升网络效率。
- 4) 算力网络：利用内生算力网络建立算网服务统一管控系统，屏蔽异构计算资源的底层差异，提供通用的计算和通信服务，实现算力和通信资源的联合调度，满足不同业务的差异化需求。
- 5) 通感融合网络：通过通信功能和感知功能的天然融合，提供丰富的感知和通信业务，并支持感知和通信的相互协同、相互赋能，以提升网络资源效率和网络性能。
- 6) 安全可信的网络架构：具备内生安全能力，实现对安全问题的自检、自防和自处。包括区块链在内的多种安全技术将作为 6G 潜在使能技术。例如，利用区块链/分布式账本的去中心化、智能合约和不可篡改特性，实现数据可信和安全，提升网络和相关应用的运行效率。

6G 网络中，包含由云和管道组成的传统集中式网络，也包含分布式的终端化网络，从

而提升网络覆盖和容量、降低时延，形成云管端有机融合的高效网络。

从宏观到微观的视角，6G 将在不同层级开展网络架构的研究，包括空天地一体和星际网连的宏观层面、以用户为中心对现有网络升级的中观层面和以人类自身为研究对象的微观层面。

3.2 天地一体化网络

未来的天地一体化通信网络是以地面网络为依托，天基网络为拓展的立体分层、融合协作的网络。天地一体化通信网络分为接入网、承载网和核心网三部分。接入网由天基接入节点和地面蜂窝接入节点组成，为终端提供泛在无线接入和移动时业务连续性保证^[8]；承载网由各种轨道卫星以及地面基站互联而成，各节点具备宽带传输、路由交换等能力，通过节点间链路完成各类业务数据在网络中的快速转发；分布式核心网是由部署在非地面网络节点的边缘核心网和部署在地面节点的云核心网两部分组成，边缘核心网和云核心网间相互协作^[9]。天地一体化总体网络架构如图 3-1 所示。

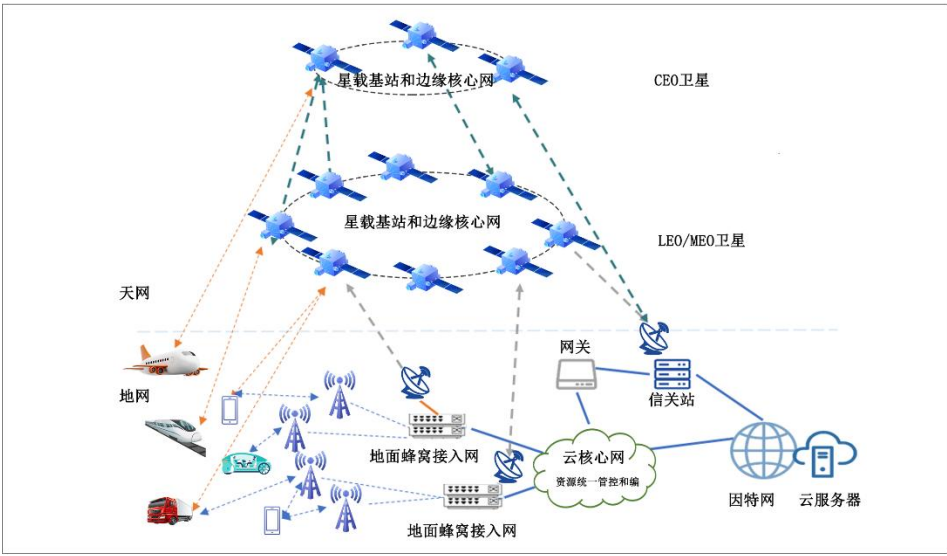


图 3-1 天地一体化网络架构

天地一体化网络以地面网络和卫星网络融合为基础，其中地面网络较为成熟，卫星网络涉及的技术通常以地面网络为基础并进行相应的改动。在此，我们将重点研究在天地一体化网络中卫星网络所涉及的技术特性。

1) 透明转发网络

透明转发网络利用现有无线接入网网络架构，卫星作为馈电链路和业务链路间的空中接口，实现透明转发网络的接入。地面网关支持必要的能力使其能够转发空中接口的信号。

2) 再生卫星网络

再生卫星可实现地面信号的再生，卫星具有信号处理、交换、网络控制等部分或全部功能。鉴于当前基站的功能分割，在再生的卫星系统中，包含两种再生形式：一种将 DU(Distributed Unit)的功能部署到卫星上，一种将 DU 和 CU(Centralized Unit)的功能一起部署到卫星上。在再生卫星网络中，需要研究和分析移动性管理等技术问题。

3) 星间链路

星间链路是指用于卫星间通信的链路，将多颗卫星互联在一起，实现卫星间的信息传输和交换，形成一个以卫星作为交换节点的空间通信网络。星间链路的引入，使得卫星移动通信系统能够更少地依赖于地面网络，更为灵活方便地进行路由选择和网络管理。

4) 核心网融合网络

卫星与地面网络可采用同一个核心网，此时，终端可以使用地面/星上接入网建立与核心网的连接。终端和核心网可以根据需求灵活地选择和变换接入方式。

卫星网络可只具备部分核心网功能，例如可将核心网用户面功能和边缘服务器部署在卫星上，星上核心网与陆地核心网之间可通过核心网网元实现互通，例如地面核心网会话管理功能网元对星上核心网用户面功能网元的选择，以及星上核心网用户面功能网元与地面核心网用户面功能网元建立连接等。

卫星核心网可与地面网络核心网独立部署，卫星核心网与地面网络核心网间通过部分地面网络功能（如数据路由、IMS 网络等）进行互通。

5) 与其它卫星系统的融合和互操作

通过与其它卫星系统（如铱星系统、Tc 系统）的融合和互操作，实现多样化的业务需求。其中铱星系统具有星际链路、星上处理等功能，并采用地面集中控制的方式。除了可以提供通话业务外，还提供全球定位等服务。Tc 系统致力于宽带业务的低轨卫星通信系统，不仅提供高质量的语音通话，还提供多媒体通信服务。不同卫星系统的融合包括通过核心网共用或核心网互通等方式实现不同卫星系统的融合和互操作。

3.3 以用户为中心网络

6G 网络更加注重用户体验质量，需要尽可能地保证用户的服务不受客观环境因素影响，如用户快速移动、障碍物遮挡、干扰环境等。与此同时，随着通信频段从目前已经商用部署的毫米波逐步扩展到更高的太赫兹频段，以上客观因素的影响变得更加严重。因此，满足用

用户体验一致性需要从网络架构到关键技术进行全盘考虑。其中，以用户为中心的网络架构设计是实现该目标的关键技术。

为了体现 6G 按照用户需求提供服务的理念，采用广泛部署的接入点，根据用户需求随时随地为用户提供服务。图 3-2 给出了一种以用户为中心的网络架构。在该架构中，引入本地接入服务以降低高密度接入点接入核心网的信令开销，同时避免移动用户频繁发生小区切换的问题，多个接入点通过回传链路连接到本地服务中心和本地数据中心，为用户提供动态、按需服务，形成“无小区”或“cell free”的网络架构。两个本地中心的引入可实现控制面和用户面的逻辑解耦，其中本地服务中心主要负责资源管理、服务质量管理和移动性管理，本地数据中心负责接入网侧用户的数据传输。本地服务中心可以通过测量用户的无线环境，制定最优的联合处理方案和服务质量控制。在本地服务中心的协调管理下，多个接入点通过相干联合发射和接收，在同一时频资源上共同为某个用户服务。对于每一个用户，每个时刻都有一组接入点来为其服务，这一组接入点称为以用户为中心的接入点子集。核心网主要由网络服务中心和网络数据中心组成。其中，网络服务中心主要负责通信控制、策略控制和网络控制；网络数据中心主要是负责核心网用户数据传输。

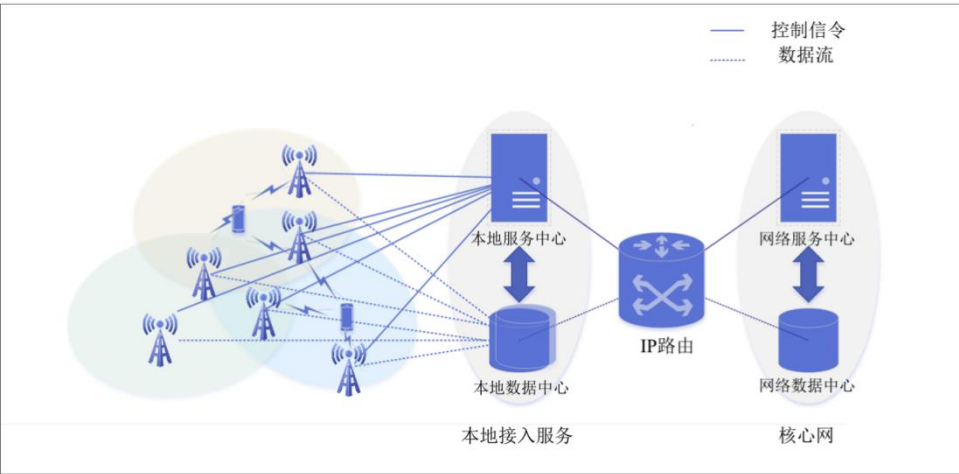


图 3-2 以用户为中心的网络架构

以用户为中心的网络是使使用户能够定义、配置和控制与其订阅的服务相关的网络功能。随着通信技术的不断演进以及越来越多关键特性的支持和引入，基于不同用户连接能力、可供用户选择用于满足用户多样需求的不同网络接入方式应运而生。除了基于多接入点的用户为中心 cell free 网络外，下图 3-3 对不同网络接入方式的支持也构成了以用户为中心网络的一部分。

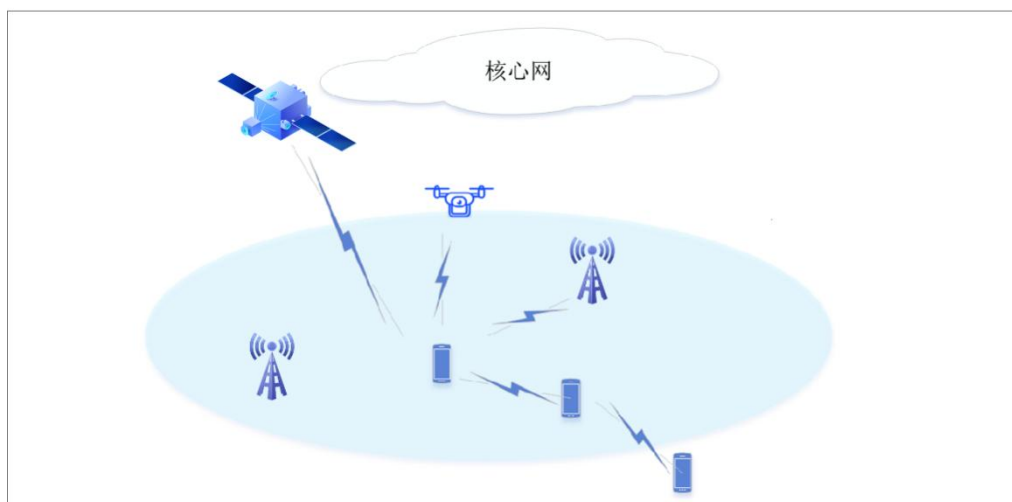


图 3-3 支持不同网络接入方式的用户为中心网络

在融合不同网络接入方式的情况下,形成不同网络节点和多终端灵活连接的接入网架构。这里不同接入方式可以包括:不同通讯系统(RAT)、分布式/集中式天线、不同传输方式(中继或直连)、卫星、无人机等,都可为用户提供满足不同需求和连接能力的服务。

以用户为中心的网络,不仅仅是一种技术的变革,更是一种思想的变革。随着以用户为中心的思想逐步渗透,需要在如下方向展开深入研究:

- (1) 网络体系结构:从接入网到核心网都需要建立用户专属定制的网络架构。
- (2) 干扰管理:以用户为中心网络中的干扰问题更加动态,需要重点研究用户间干扰和接入点子集间干扰的动态估计预测方法以及干扰协调机制。
- (3) 资源管理:基于用户类型、业务特征以及周边环境的感知,实现动态的资源调度、QoS 满足。
- (4) 以用户为中心的用户自主选择:考虑用户的自主需求,实现用户自主的网络接入方式选择、业务性能保证。

3.4 服务化网络

5G 核心网(Core Network, CN)引入了服务化架构,把核心网控制面(Control Plane, CP)拆解为不同的网络功能(Network Function, NF)。服务化的网络功能可较独立的进行功能演进、按需部署。5G 服务化架构的研究主要聚焦在核心网控制面^[10]。随着大数据、AI 等技术引入到网络,对接入网(Radio Access Network, RAN)和核心网用户面(User Plane, UP)服务化需求逐渐增多。例如,接入网的信息开放有助于网络的智能化功能进行大数据统计、预测和协调网络资源调度、减少信令开销,核心网用户面的服务化能够协助简化网络信令,有助于跨域业务的确定性传输,同时模块化也有助于实现网络的云化部署和按需定制。为更好的满足服务提供商、应用程序开发商、终端(User Equipment, UE)用户对模块化架构、开

放系统和解决方案的需求，6G 中将进一步增强服务化架构，主要包含接入网和核心网用户面。

接入网的服务化包含三部分，一是接入网的能力开放，可以从接入网与核心网接口的服务化入手^[1]，将接入网作为一个整体与其他网络功能直接交互感知数据、调度信息等。二是接入网控制面的服务化，将接入网控制面拆分为不同的网络功能，例如无线承载管理、连接与移动性管理、广播多播服务、信令传输功能等。接入网控制面与核心网的特定服务直接交互，根据场景按需部署接入网的功能。三是接入网用户面的服务化，减少不必要的协议栈功能堆叠，简化协议设计。

核心网用户面的服务化包括两个方向：能力开放和功能模块化。核心网用户面的能力开放包括向网络内部开放和向网络外部开放。向网络内部开放包括直接开放承载相关信息、算力信息等。向网络外部开放包括开放网络调度信息、网络异常信息等，同时外部数据网络（Date Network, DN）也可以向用户面节点直接提供数据包的特性等业务信息。核心网用户面的功能可以分为隧道管理模块、业务处理模块、数据分析模块等。隧道管理包括地址管理、QoS 实施、数据路由等；业务处理包括时间服务、存储服务、计算服务等；数据分析包括数据包检查、合法拦截、冗余处理等。

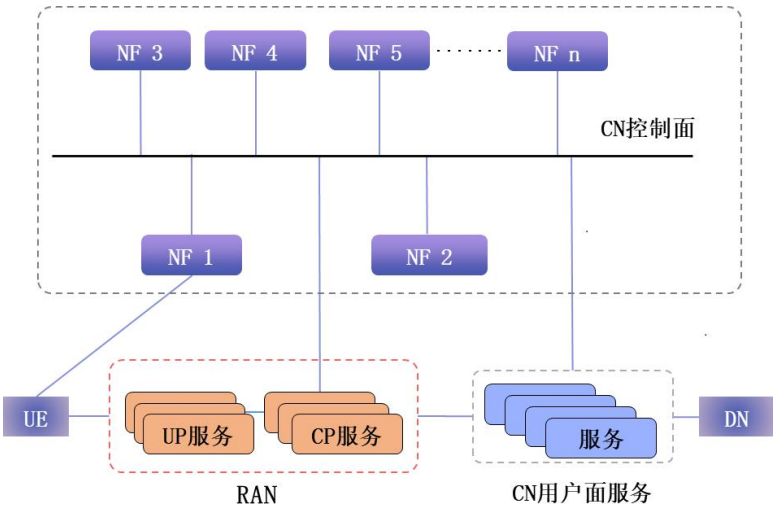


图 3-4 6G 服务化网络示意图

3.5 算力网络

智慧城市中无人驾驶、元宇宙等业务既需要大量计算也需要高性能通信。算力网络是通信、计算、存储、智能化等功能的高度融合，可实现网、云、边、端的高效协同，满足不同业务对计算和通信的差异化需求。算力网络通过综合调度不同网络或节点中的算力和通信资源，实现计算资源和通信资源的优化协作。

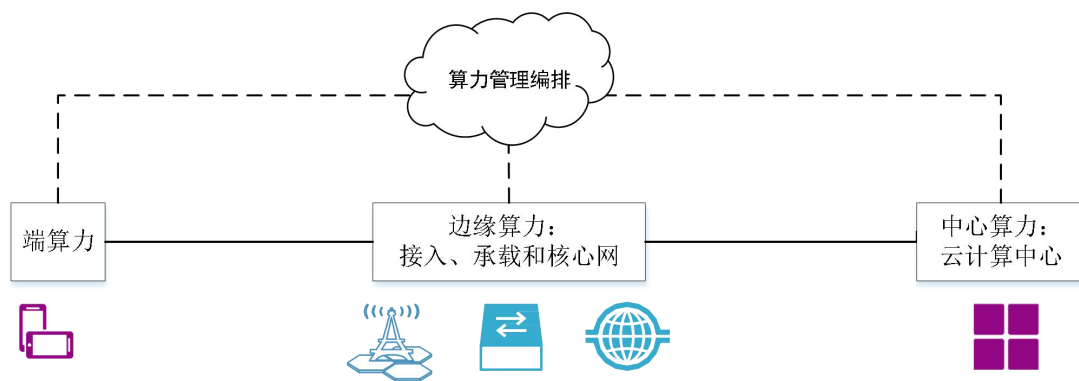


图 3-5 算力网络示意图

算力网络中终端、边缘、云等节点各自具备不同的算力资源和通信能力。如图 3-5 所示，算力网络需建立算网服务统一管控系统，进行算网资源状态和业务需求的感知，屏蔽异构计算资源的底层差异，实现算力和通信资源的联合调度和自动匹配。具体来看，包括以下关键问题：

- 1) 算力网络的需求研究：智慧工厂、城市等不同环境中对算力和通信的需求可能不同。垂直行业如机器人控制通常要求低时延和确定性，城市环境如自动驾驶对智能化要求较高^[12]。同时业务执行主体的计算和通信能力差异也可能较大，如车载终端算力较强并且供电方便，XR 眼镜算力较弱并且电能有限。网络自身的操作维护也需要 AI 的参与，涉及大量算力。需要研究不同类型的业务和终端组合形成的综合性需求^[13]；
- 2) 算力网络的架构研究：算力即计算资源，包括存储器、CPU、操作系统等。网为通信资源，为计算提供连接。算力网络以网络为纽带，将离散的计算资源与通信资源统一管理。计算和通信资源位于不同的网络如移动网络、固定网络，位于网络的不同位置，如终端、接入网、核心网等，也可能具有不同的资源形态，如 CPU、DSP 等。算力网络应该能够向用户屏蔽网络差异和资源形态差异，提供通用的计算和通信服务；
- 3) 算力网络的运营管理：算力网络中的通信资源包括有线资源和无线资源，算力资源包括终端算力、运营商算力和第三方算力等。算力网络的运营管理将以业务需求为驱动，根据网络节点的计算和通信能力，感知资源的实时状况，结合智能化的算力监测和性能分析，通过合理的算网联合编排，提供无处不在的算力服务，并降低计算和通信的综合能耗，实现绿色低碳的算网运营^[14]；
- 4) 算力的度量：面对差异化的基础设施和业务需求，需要建立统一的算力和通信度量标准。可以从通用业务能力和专用业务能力不同维度来度量。通用业务能力包括计

算、存储、时延等。计算包括 CPU、FPGA 等芯片能力模型，存储包括存储空间、存储速度等。专用业务能力指处理特定业务的能力，包括图像处理、语音处理等^[15]。

3.6 通感融合网络

感知网络可进行面向区域的感知和面向物体的感知，对物体的位置、速度、方向、距离等进行感知检测。感知网络可广泛应用于健康检测、智能家居等智慧生活，智能工厂、车联网、无人机管理等行业应用，以及环境监测、公共安全监测等社会管理。为实现空口资源的高效利用、通信业务和感知业务的深度融合，通感一体化设计是 6G 网络架构的一个关键特征^[16]。

6G 通感网络是通信功能和感知功能天然融合的一体化网络，通感网络可以提供丰富的通信和感知业务，满足未来各种应用的需求。通感网络提供的通信业务与感知业务作为两种业务形态共同存在；另一方面，通感网络的感知数据和感知结果可以辅助通信系统的优化及通信业务的性能提升。通感网络还可以提供给 AI/ML 功能模块提供更加丰富和实时的感知数据。

通感融合网络需具备以下三个特点：

- 1) 网络资源共享，包含频谱资源、软件资源、硬件资源等资源的共享；
- 2) 支持通信业务和感知业务的独立共存；
- 3) 感知功能和通信功能间的相互协同、相互赋能。

通感融合的网络架构设计如下图 3-6 所述：

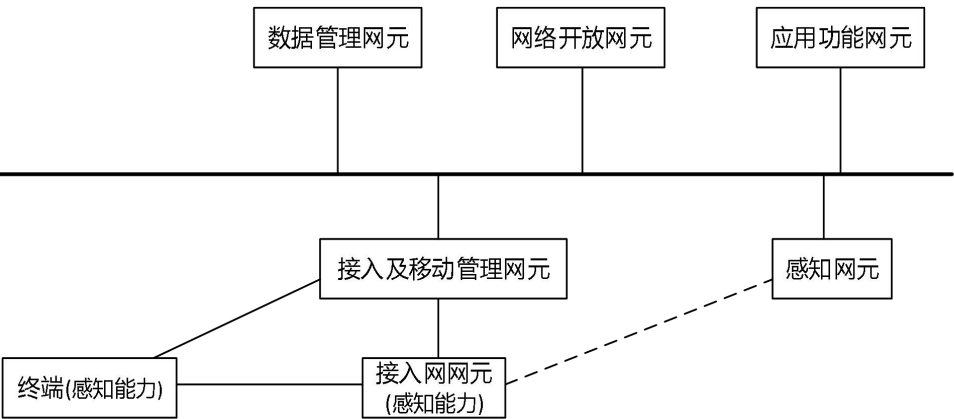


图 3-6 通感融合的网络结构示意图

在图 3-6 中的服务化的网络架构中，感知网元(Sensing Function, SF)通过接入总线和其它网元相互作用实现感知功能和通信功能相互融合^[17]。由感知网元实现感知业务管理功能，包含感知设备选择、感知业务触发、感知模式配置、感知数据处理、感知结果输出、感知

QoS 监控等功能。感知网元可部署在核心网侧；对于本地化场景，感知网元或感知网元的部分功能可部署在接入网侧。

通感网络中的终端和接入网网元中需具备感知能力，还可具备一定的感知业务管理功能，从而可实现感知功能的灵活部署，并方便实现接入网侧的感知功能和通信功能的相互融合。

3.7 安全可信网络

随着网络架构的改变和新业务、新型终端的引入，6G 网络面临着新的安全威胁。依靠信息化系统和安全系统的聚合、业务数据和安全数据的聚合、IT 人才和安全人才的聚合，从网络内不断培养起自适应、自主和自成长的安全能力，网络安全逐步进化到“内生安全”时代。为实现智慧内生安全，需要研究以下潜在的 6G 安全技术：

- (1) 区块链技术：利用区块链技术实现消息与数据加密、身份识别、智能合约和数据保护等安全保护机制，进而在 6G 网络中支持安全要求更高的业务场景，如原生数字货币；
- (2) 零信任安全体系：打破传统的安全体系边界，在所有终端和网元实体之间建立泛在化的零信任安全体系；
- (3) 柔性重构的差异防护：为不同的防护场景提供差异化的安全资源和安全能力。安全能力按需柔性编排、重构和组合，既满足安全需求又减少不必要的资源浪费；
- (4) 物理层安全技术：利用无线信道的特征差异，提取无线信道的“指纹”，提供实时生成、无需分发的快速密钥，形成无线通信“物理隔离”效果的私密传输通道，设计以信号传输路径和信道特征为核心的认证机制。

4 6G 核心技术

为了适应 6G 场景和需求的多样性, 6G 核心技术也将会呈现多元化, 如图 4-1。一方面可以是来自现有通信技术的进一步演进, 如超大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术、非正交接入技术、新的调制编码技术等。另一方面, 6G 也会去探索全新的技术领域, 例如拓展频谱的太赫兹通信技术和提升频谱效率的全双工技术, 还有将通信与感知融合在一起的联合设计。此外, 6G 还会研究星地协同传输技术, 实现从天空到陆地的无死角覆盖。同时, AI 技术在 6G 中也会起重要作用, 它可以同其它绝大部分 6G 核心技术相结合, 进一步优化 6G。

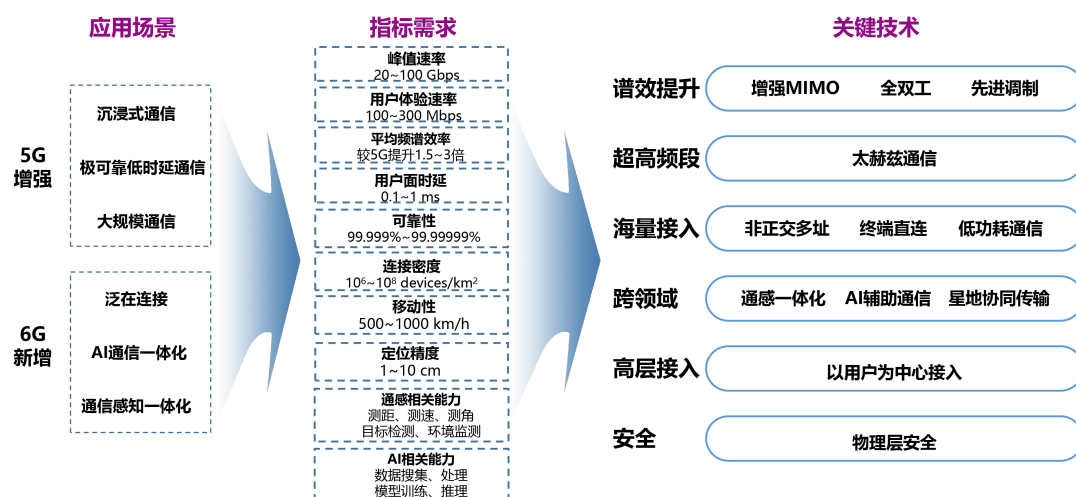


图 4-1 面向 6G 应用场景的潜在关键技术

4.1 增强 MIMO 技术

MIMO 技术在无线通信系统中具有极其重要的地位。在 6G 系统中可以通过部署超大规模天线阵列来提供更高的空间分辨率, 从而获得在三维空间内更广泛更灵活的网络覆盖、更高的频谱效率和更高的定位精度等。在应用场景方面, MIMO 技术主要致力于热点地区和室内场景的覆盖、高自由度的水平和垂直维度的立体覆盖、多普勒效应显著的超高速覆盖、与卫星系统相结合的高精度空间定位与感知等。超大规模 MIMO 技术作为 5G MIMO 的进一步增强, 也将助力实现 6G 的数据速率、频谱效率、能量效率、更高速移动下的 QoS 等性能指标。

在未来网络的阵列结构方面, 天线数更多、分布区域更广、依据场景的部署更灵活, 将成为未来阵列结构的显著特点。超大规模 MIMO 可应用于各种新型的网络节点和架构, 以

及大幅扩展的频谱范围，并以更智能灵活的方式服务于移动用户。此外，可重构智能超表面作为网络阵列的辅助，通过构建可控的无线环境来进一步提升系统的覆盖与容量^[18]，其与超大规模 MIMO 的结合也将为 6G 提供更有力的支撑。

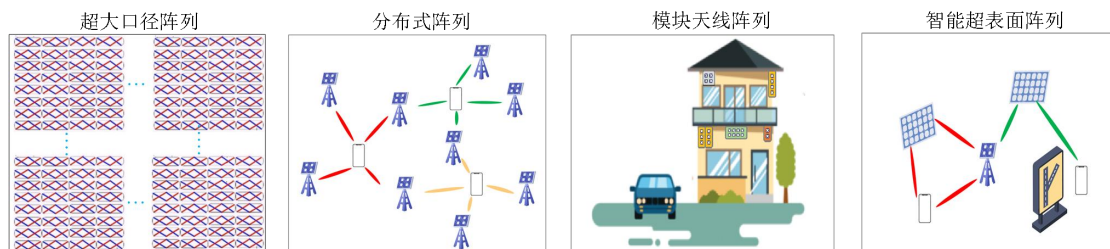


图 4-2 未来超大规模 MIMO 阵列结构示意图

- 拥有巨大数量天线的超大口径阵列可通过提供非常高的空间分辨率来服务于大量用户。超大口径阵列所面临的近场球面波和非平稳信道，使得在设计复用机制时可以利用空间信道的角度信息和纵深信息，以及基于信道稀疏性动态设计整个阵列的子阵列选择、功率分配、干扰消除等^[19]。在超大口径阵列的设计中还需要考虑不规则阵列的信道反馈和灵活且低复杂度的信道估计方案。
- 分布式天线阵列是由分布在不同地理位置的站点共同构成的，通过多种灵活的拓扑结构满足大容量需求的场景，提供给用户一致性体验，真正做到以用户为中心。分布式天线阵列的技术核心是打破过往蜂窝小区的概念，利用站间协作来充分消除站间干扰，通过连接多个射频拉远单元的基带处理单元来实现无边界的用户覆盖。分布式天线阵列的技术挑战主要包括：站点间的动态协作构建、站点间的同步和信息交互、多站点协作预编码、空口校准技术等^[20]。
- 模块天线阵列是一种能够根据具体场景需求将超大规模天线阵列分割为多个独立子阵列的方式，子阵列的实现是基于预定义的天线模块拼装，不同拼装方式的子阵列可具有预期的天线数量和结构，也可以共同构成一个分布式天线阵列^[21]。这种全新的天线阵列设计，需要灵活的天线模块配置、动态的天线模块选择、不同模块组合的子阵列利用模块间相关性的 CSI 获取、多站点子阵列间联合的码本设计和 CSI 报告设计等。
- 可重构智能超表面是由大量的电磁单元构成，以软件定义的方式动态控制超材料单元的电磁特性，通过反射、折射、聚焦、调制以及这些的任意组合来调谐入射信号，具有低成本、低能耗、可编程、易部署等特点，有望突破传统无线通信的约束，给未来移动通信网络带来一种全新的范式^[22]，具有广阔的技术与产业前景。比如：面向网络深度覆盖和提速扩容的需求，基于智能超表面辅助的网络覆盖补盲和多流

增速将是典型的应用方式；面向前沿新技术，智能超表面具有与太赫兹高频通信、通信感知一体化、全双工等多个技术领域相结合的可能。

在未来的通信系统中，不仅网络侧的天线阵列结构发生巨大变化，终端侧的天线数量也将增加，这使得在减小终端侧天线尺寸和降低功耗等方面具有更加强烈的需求，并且也需要更加先进的工艺设计，在很小的空间内实现多天线共存。在终端侧的新型天线结构设计包括：贴片天线 AoB（Antenna on Board）、屏上天线 AoD（Antenna on Display）、封装天线 AiP（Antenna in Package）、片上天线 AoC（Antenna on Chip）等。



图 4-3 终端侧新型天线结构示意图

- 贴片天线是一种高度集成化的天线，通过直接在印刷电路板 PCB（Printed Circuit Board）上承载天线（Antenna）的方式，达到简单、高效、便捷的目的。贴片天线是一个饼状的定向天线，由两个金属板叠加组成，中间有个片状介电质，平面结构尺寸小，支持光刻工艺，材料成本低，工艺比较成熟；
- 屏上天线采用透明导电材质作为天线，将天线与显示屏（Screen）集成在一起，用于 OLED（Organic Light Emitting Diode）和 LCD（Liquid Crystal Display）屏幕，被遮挡概率较低；
- 封装天线采用集成电路封装技术，把天线阵列封装到芯片内，在毫米波应用较多，支持多种材料，可以兼顾成本、性能和体积；
- 片上天线是在硅衬底上制作，将天线和射频集成电路 RFIC（Radio Frequency Integrated Circuit）在晶片级别集成到同一芯片内，极大缩减天线尺寸，要求相同的材料和制程。

随着对未来多样化天线阵列结构的探索，在 6G 超大规模 MIMO 中将会衍生出一系列技术问题，一些传统的 MIMO 特性与技术方案将随着天线数量增加和阵列结构改变而发生重大变化。比如：

- 1) 3GPP 现有信道模型中的平面电磁波假设将不再适用。当天线阵列的孔径较大时，到达处于天线阵列近场的终端位置的电磁波呈现出球面波特性和，因此需要对超大规模 MIMO 进行球面波信道建模，根据各天线阵元的散射体环境差异来独立建模空间参数等。以充分利用超大规模 MIMO 在近场信道模型下的空间自由度为目标，未来需要研究在近场通信中，通过信道估计与反馈，实现基于方向和距离的波束赋形技术和预编码技术，以及用户间新的复用机制，进而提升近场频谱效率；

- 2) 在 5G 中的波束管理是通过波束扫描确定最优收发波束对，实现基站与终端间的波束对齐。超大规模 MIMO 的波束更加精细化，空间信道可能会具有稀疏性。所以在未来需要探索低系统开销和低时延的波束测量与反馈方案，支持高频大带宽系统和超高速场景中的有效波束跟踪；
- 3) 传统的预编码技术所需的矩阵运算在超大规模 MIMO 中也有待增强，大量天线阵元的引入和多种可能的阵列形态都需要改进现有的码本设计和码本选择，甚至是为用户提供服务的部分天线阵列选择和用户间的干扰管理。此外，在信道状态信息获取与反馈方面也要以寻求性能、复杂度、精度、开销之间的折中为目标；
- 4) 智能超表面技术的实现面临着多种挑战，主要是能够及时为每个场景找到大量可控元素的有效配置，同时所需开销尽量低。它需要快速准确地估计智能超表面和通信端点之间的信道，这是实现高效预编码所必需的基础。除此之外，如何配置信号幅度和相位的智能遥控机制也极具挑战性。

在未来 6G MIMO 的技术研究和产品化设计中，面临着对应用场景的探索、新型阵列架构的引入、传统 MIMO 技术的增强、与多种新兴技术的融合、折中性能和复杂度的各种软硬件设计等方面的挑战，进而将对移动通信网络产生重大而深远的影响。

4.2 全双工技术

考虑到全双工技术的高复杂度、高功耗和高成本以及商用实现的连续性，全双工演进预计将分为 4 个阶段。第一阶段为基站侧子带全双工(Subband Non-overlapping Full Duplex, SBFD)，终端仍然沿用传统半双工模式。SBFD 可以在不同频域资源上同时进行数据发送和接收，对自干扰抑制能力的需求有限。此时，在不同频域资源上，基站可以同时服务一个用户的上行传输以及服务另一个用户的下行传输；第二阶段中 SBFD 将应用于基站和终端。此阶段的挑战来自于终端尺寸，复杂度以及能耗的限制；而从第三阶段开始，基站侧将首先实现同时同频全双工(In-band Full Duplex, IBFD)，终端可能为传统半双工模式或者 SBFD。IBFD 能够在同一时频资源上同时进行发送和接收，与传统的时分双工和频分双工技术相比，在理想情况下可以获得近似两倍的频谱利用率。进一步，随着终端能力的增强，终端可引入全双工技术，从而进入第四阶段。在第三，四阶段中，基站和终端都需要有很强的自干扰消除能力并且能够适应全双工基站和传统半双工基站混合组网、全双工/半双工不同终端类型共存等复杂场景。

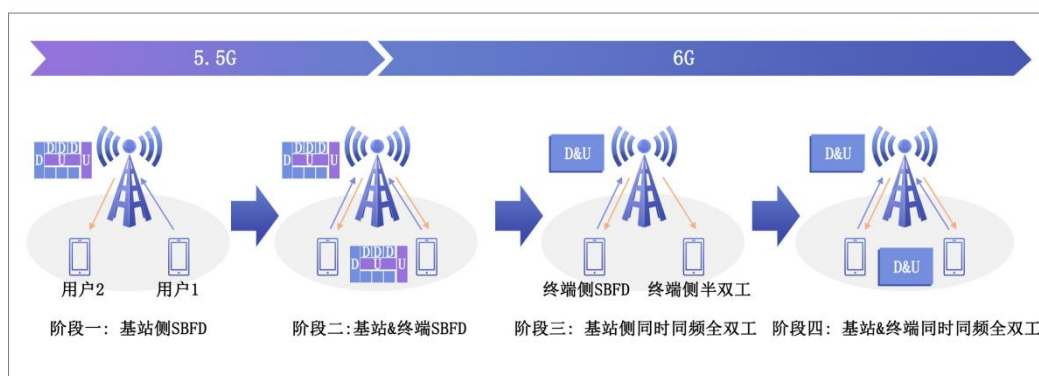


图 4-4 全双工技术发展趋势

全双工技术商用的最基本挑战是消除同一设备内的发射信号对接收信号产生的自干扰。关于自干扰抑制技术的研究已经在业界全面展开，形成了天线侧，射频域与数字域三重递进的联合自干扰抑制技术，如图 4-5 所示。

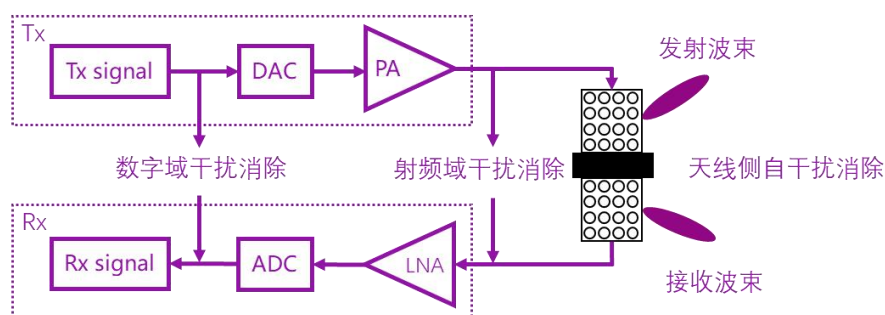


图 4-5 自干扰消除示意图

- 天线域的自干扰抑制：通过增加收发天线距离，使用吸波/反射材料增加隔离度^[23]；或者，在收发天线间添加可调元件来模拟干扰对消信号^[24]，增加了射频前端设计以及天线封装的难度。
- 射频域自干扰消除：在信号进入接收机 ADC 之前，运用多抽头结构模拟对消干扰信号，可以有效地防止接收机以及 ADC 进入饱和态。具体可分为时域/频域多抽头和数字域辅助方法^[25]，其干扰消除能力与射频域器件成本以及射频电路大小成正比。
- 数字域干扰消除：通过线性滤波器和非线性滤波器对线性和非线性干扰进行建模，性能优越，但算法和实现复杂度高。

目前，IBFD 在 20MHz 的带宽上可以实现 110dB 的自干扰抑制^[26]，但仍然不能达到商用需求。而 SBFD 的干扰抑制能力如表 4-1 所示。由于收发信号的频域隔离，大大减少了

对自干扰抑制能力的需求，总干扰消除能力达到 135 ~ 155 dBc，初步满足商用需求。随着带宽，发射功率，天线数目的增大，自干扰抑制的实现难度也会逐渐增大，因此全双工技术距离真正商用还任重道远。

表 4-1 SBFD 自干扰抑制能力

抑制方法	抑制能力
天线域自干扰消除	70 ~ 80 dBc
频域隔离	45 dBc
波束隔离	~10dBc
数字域自干扰消除	10 ~ 20 dBc
总自干扰消除能力	135 ~ 155 dBc

目前，3GPP 在 Release-18 对基站侧 SBFD 的各种跨链路干扰建模展开了讨论和研究，并基于典型场景的连接损耗（coupling loss）进行了校准。如图 4-6 所示给出了 Urban Macro 和 Indoor 场景的 coupling loss 曲线。考虑到 gNB 与 UE 发射功率差值以及子带隔离，SBFD 中的跨链路干扰将略小于接收信号功率，而在 IBFD 中，跨链路干扰将大于接收信号功率。所以如何有效地对跨链路干扰进行测量，规避以及抑制，对于全双工技术同样至关重要。

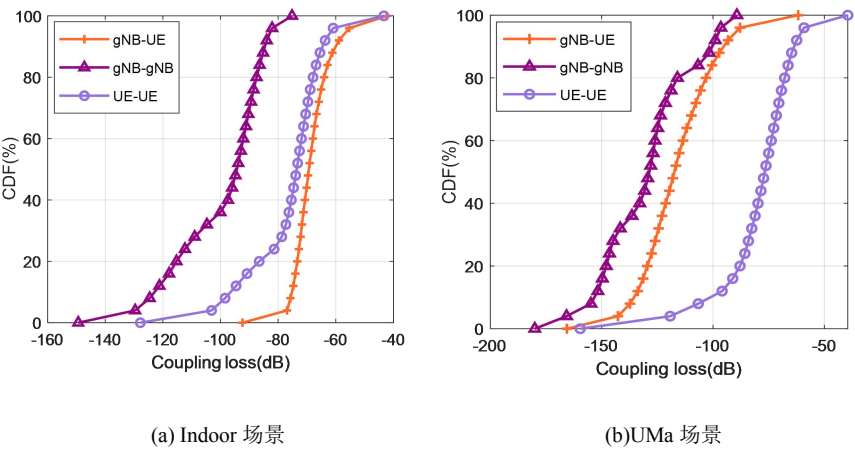


图 4-6 Indoor 和 Urban Macro 场景 coupling loss

IBFD 技术相比于传统的半双工技术甚至 SBFD 技术，可以预期得到更高的频谱利用率，从而实现底层物理层技术的一个飞跃。但是在成功商用之前，还有很多关键技术需要持续关注，例如：

- 1) 全新的帧结构设计：IBFD 的上下行传输所占据的时频资源可以部分或者完全重叠在一起。相比于传统 TDD 系统下的上行时隙和下行时隙，相当于增加了一种上下行同时存在的全新时隙结构。此外，针对一些重点信道/信号可以考虑采用一些低干扰的传输方案，以保证其通信性能。

- 2) 参考信号的设计：通信系统中常见的参考信号如同步参考信号、解调参考信号、信道状态信息参考信号等，其接收性能的好坏直接影响最终的通信质量。考虑在 IBFD 系统中不可忽视的干扰问题，设计抗干扰性能优异的参考信号会是一个重要挑战。
- 3) 极具挑战的干扰管理：IBFD 好比是一把双刃剑，一方面可以带来的高频谱利用率，同时也带来了更多的干扰。为了获得预期的 IBFD 性能增益，与之匹配的高精度干扰识别、干扰测量及干扰控制机制也是必需的。

可以预见，在未来 6G 网络中会出现全双工基站和传统半双工基站混合组网、全双工/半双工不同终端类型共存的情况。全双工信息传输模式也会进一步从基站和终端间通信扩展到终端直连全双工通信。同时随着全双工基站/终端在网络中比例的增加，网络中的干扰也会显著增加，相应网络内的干扰抑制和干扰管理也是要面对的挑战之一。

4.3 先进调制技术

随着通信系统的发展，调制技术也从适用新的应用场景、降低实现复杂度、增强一体化设计、降低峰均功率比、提升效率等各个方面进行了改进。在未来 6G 中，传统的调制技术可能被继续沿用，但同时部分新型调制技术则可以根据其特性应用于特殊的场景中，如：正交时频空 (Orthogonal Time-frequency Space, OTFS) 调制^[27]可以运用于通感业务中，索引调制^[28]可以应用于上行小数据传输的业务中。

■ OTFS 调制

在 4G 及 5G 通信系统中，OFDM 为主要调制技术，该技术将符号调制于多个正交的子载波上并通过添加循环前缀的方式来对抗多径信道时延扩展和符号间干扰。OFDM 调制技术具有高频谱利用率、抗频率选择性衰落等优势，但同时也有高峰均功率比 (Peak-to-average Power Ratio, PAPR)、频移敏感性等缺点。这意味着在高速移动场景下使用 OFDM 调制并不能获得较好的系统性能，无法满足 6G 典型的高铁行驶、无人机及自动驾驶场景下的通信需求。为解决上述瓶颈，OTFS 调制技术被提出并获得广泛关注，成为了 6G 备选调制技术之一。

具体地，OTFS 在 6G 通信感知一体化的应用方面有巨大的潜力。从感知能力上来看，OFDM 与 OTFS 都可以用于目标的距离、速度估计，但是 OTFS 对时延、多普勒估计的克拉美罗界显著低于 OFDM，所以在感知精度上更具优势。

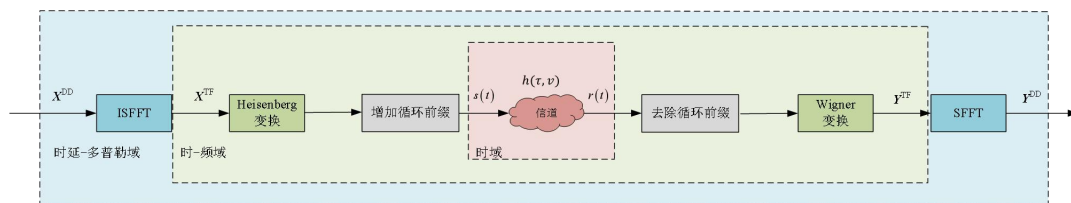


图 4-7 OTFS 系统框图

OTFS 系统流程如图 4-7 所示，OTFS 调制的核心特点就是利用二维辛逆有限傅里叶变换（Inverse Symplectic Fast Fourier Transform, ISFFT）和二维辛有限傅里叶变换（Symplectic Fast Fourier Transform, SFFT）使信号在时-频域和时延-多普勒域之间进行转换。ISFFT 将时延-多普勒域的信号转换至时-频域，使得调制符号可以扩展至整个时-频域的平面上。相当于在高速移动场景下，每个信号仍然可以经历相对平坦的信道，使得系统具有更好的鲁棒性。

对于循环前缀的添加/消除，OTFS 系统有不同的实现方案，分别为：多循环前缀方案和单循环前缀方案。将一个 $M \times N$ 个符号块定义为一个 OTFS 帧，每 M 个符号为一个数据块，则不同的循环前缀方案如下图 4-8 所示。当使用单循环前缀方案时，OTFS 系统可以避免不同帧间的干扰；而在多循环前缀方案下，OTFS 系统不仅可以避免帧间干扰，还可以避免数据块间的干扰。

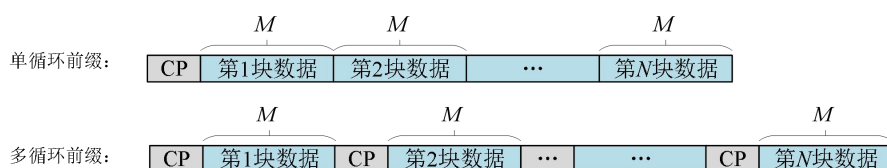


图 4-8 不同循环前缀方案下的 OTFS 帧

OTFS 的实现流程可以视为在 OFDM 调制流程的基础上，增加了预处理及后处理，OTFS 系统实现时可以尽可能复用已有的 OFDM 调制解调模块，并在此基础上增加 ISFFT 和 SFFT 模块，使系统有更好的兼容性。

以 OFDM 的误比特性能来对比，OTFS 及 OFDM 在相同仿真条件下的系统性能如下图 4-9 所示，仿真参数可见表 4-2。对比看出，在高速移动场景下，OTFS 误比特性能更优。

表 4-2 OTFS 与 OFDM 性能比较参数

配置项目	子载波 M	符号数 N	调制方式	CP 长度	多径数 P	最大时延索引	检测方式
设置值	128	32	16QAM	10	9	5	MMSE

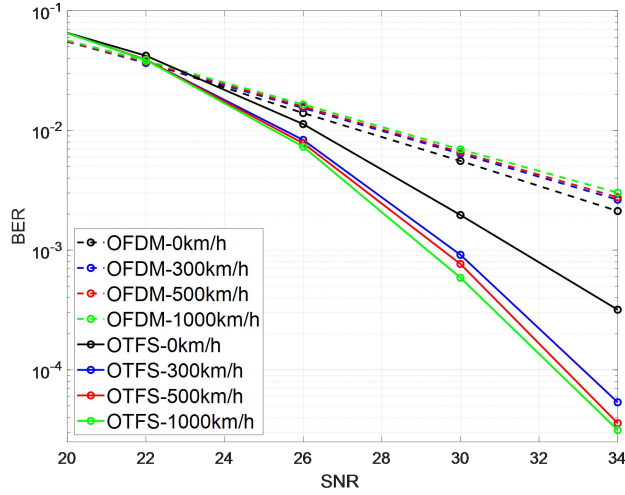


图 4-9 OTFS 与 OFDM 误比特性能比较

总的来说，在高速移动的场景，OTFS 相比于 OFDM 具有更多的优势。OTFS 具有较低的峰均比、更高的频谱效率和传输效率。此外，OTFS 调制技术可利用在时延-多普勒域等效信道矩阵的稀疏性，降低信道估计开销及均衡复杂度。

OTFS 技术虽然具有诸多优势，但是同样也存在着一些挑战：

- 1) 信号检测：OTFS 信号检测在时域、时延-多普勒域或者时延-时间域均可进行。如，传统的线性最小均方误差(Linear Minimum Mean Square Error, LMMSE)算法可以应用于时域和时延-多普勒域进行信号检测，其检测性能较优，但复杂度较高。为了降低检测复杂度，可以使用消息传递(Message Passing, MP)算法在时延-多普勒域进行检测，这种算法相较 LMMSE 可以获得更好的检测效果。此外，还可以将最大比值合并(Maximum Ratio Combining, MRC)算法应用于时延-多普勒域、时延-时间域进行信号检测，该算法还可以适用于加循环前缀的 OTFS 信号检测。在现有的研究结果基础上，如何结合不同域的信道特性，设计低复杂度的 OTFS 信号检测算法，还需要被进一步分析研究。
- 2) 导频设计：基于 OTFS 调制的系统需要通过发送并接收导频符号进行信道的估计。从时延-多普勒域上观察，由于多径和物体运动的影响，发送的导频符号会在接收端发生偏移扩散，而偏移量和信道的最大时延及多普勒有关，会造成符号间干扰，进而影响系统性能。为了解决这个问题，需要在导频设计的时候预留保护间隔，使各个符号间互不干扰。但是引入保护间隔的同时会使传输的数据量变小，进而降低传输速率。所以，如何在尽量减少干扰的条件下提高传输效率，是 OTFS 导频设计需要解决的问题之一。一种可能的实现方案是根据信道的最大时延和多普勒值来准确设置保护间隔。如图 4-10(a)所示，传统多天线导频设计方案下，若信道多普勒频移较大，为了使信号间相互不受干扰，通常会某些时延上对应的多普勒维度上的所有资源用作保护间隔。而图 4-10(b)中，每一个导频在时延与多普勒维度上留有的间隔分别被设计为 l_{max} 和 $2k_{max}$ （其中 l_{max}

和 k_{max} 为和信道的最大时延、多普勒有关的参数), 在多个天线发送导频时, 还可以使导频之间的保护间隔在时延维度上交叠。由此, 通过精确设置保护间隔及共用保护间隔的方式, 来达到节省导频开销的效果。

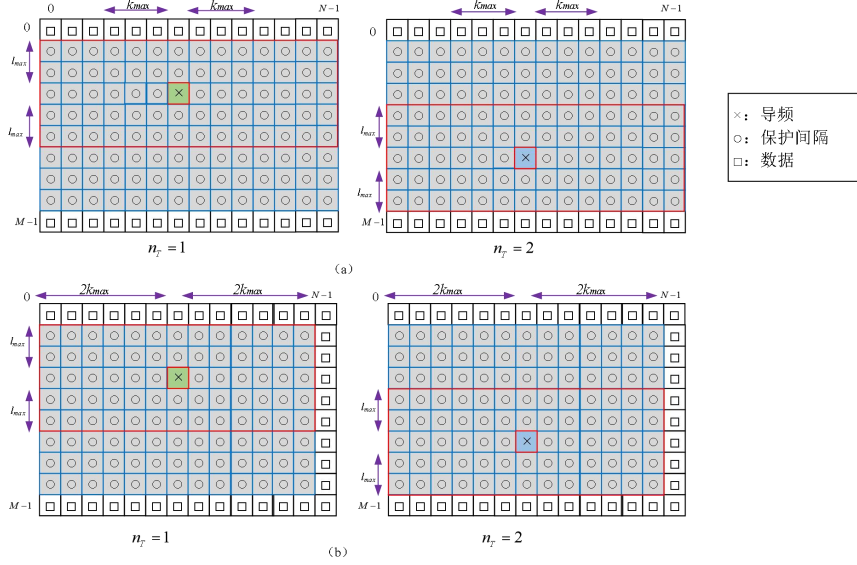


图 4-10 导频设计图样

上述方案仅是针对 OTFS 导频开销问题的一种可能的解决方式。此外, 如何进行多天线多用户的导频设计, 如何实现低 PAPR 的导频信号设计, 都是需要优化解决的问题。

- 3) 低 PAPR 设计: 与 OFDM 有所不同, 虽然 OTFS 的 PAPR 不随着载波数的增加而增加, 但是其 PAPR 的最大值与时隙的数量 N 有关。此外, 在基于导频的 OTFS 系统信道估计中, 传统方案下导频会被设计为高功率脉冲, 也会导致系统 PAPR 增加。PAPR 过高可能会使信号无法处在放大器的线性区域, 如何解决这个问题, 还需要从系统参数选取、导频设计等方面深入研究。

索引调制技术

索引调制技术是近年来的研究热点并有望成为应用于 6G 的新型调制技术。索引调制的基本结构流程图如下图 4-11 所示:

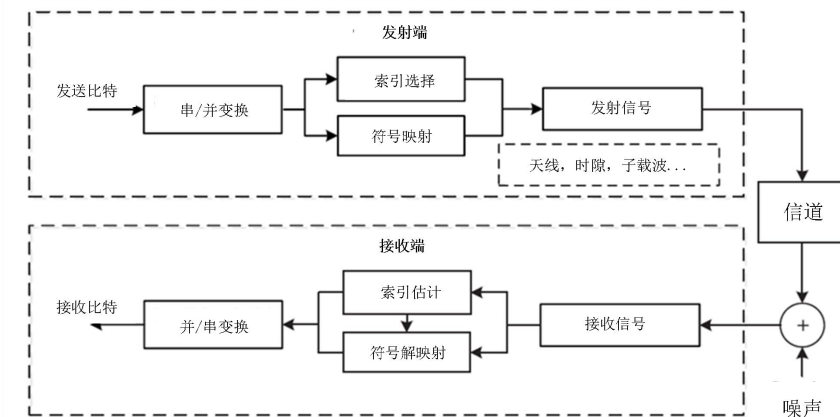


图 4-11 索引调制原理图

可以看出，索引调制的核心是将索引选择和幅度相位调制技术相结合，能够通过使用一个或多个不同资源类型的索引作为信息携带载体来进行信息传递。所以，相比于传统的幅度调制、相位调制，索引调制具有低能耗、低复杂度、低成本及灵活配置等优势。索引调制的信息携带载体种类颇多，目前已提出的主要新型索引调制技术如表 4-3 所示：

表 4-3 索引调制类型及其特征

调制类型	信息传递媒介	优势
空域-索引调制	天线激活状态	层间干扰小、译码复杂度低、吞吐量大、射频单元少、成本低
频域-索引调制	载波激活状态	吞吐量大、载波间干扰小、频率选择性增益
时域-索引调制	时域激活状态	射频和导频资源开销小、译码复杂度低
媒介调制	不同可变的信道状态	吞吐量大、能量效率高、部署灵活、空间约束较低
多域资源联合调制	时域、频域、空域	灵活性高、适用广泛

索引调制在获得额外频谱效率和译码性能增益的同时也会对实际系统设计带来挑战。对于空域-索引调制，接收端可采用最大似然检测译码算法达到最优性能。然而当发射天线数或者同时激活射频数较多时，最大似然检测复杂度呈指数级上升，实际系统难以实现。类似的，对于频域-索引调制，检测复杂度也会随着子载波数量的增加而增加。对于多域资源联合调制，如何在保证较低复杂度的基础上对多域资源进行联合检测，也是需要解决的难题。

根据索引调制的特点，可以将其应用于上行小数据传输的场景中，如：物联网场景。虽然传输速率较低，但是可以满足通信需求且具有较高的能量效率。此外，基于现有技术，未来索引调制还可以和 MIMO、非正交多址技术等进行结合，考虑联合设计的系统方案。

4.4 太赫兹通信技术

太赫兹频段位于 0.1~10 THz，该频段介于技术相对成熟的微波频段和红外频段两个区

域之间，有着极其丰富的无线频谱资源。但受技术和器件限制，太赫兹频段一直未被真正地发掘。6G 时代有望依托太赫兹频段的丰富资源，在几十甚至上百 GHz 的超大通信带宽上实现 Tbps 级别的高速通信。除高传输速率之外，太赫兹通信还具有抗干扰能力强、可穿透等离子体鞘套、波长短等特点^[29]。基于以上特点，太赫兹通信可应用于：

- 光纤替代场景：在数据交换中心和基站高速回传等场景中，可以利用太赫兹无线通信来解决光纤铺设复杂及难度大的问题。
- 空间通信场景：利用太赫兹波在太空传输损耗小且可穿透等离子体鞘套的特点，太赫兹通信可在星间或飞行器间的通信场景中发挥优势。
- 微观通信场景：由于太赫兹波极短，可支持孪生体域网、芯片间通信等终端尺寸极小的场景，进而实现无线通信从宏观到微观的全面覆盖。

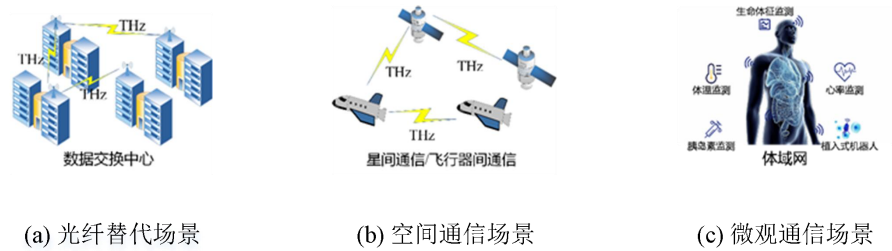


图 4-12 太赫兹应用场景

虽然太赫兹通信可以在速率提升和场景扩展等方面为 6G 提供极大的助力，但目前要实现太赫兹通信也存在着不少挑战与阻力：

- 1) 分子吸收：太赫兹电磁波易被大气中的水、氧气等分子吸收，导致其传输距离十分有限^{[30][31]}。其中，水分子吸收特性如图 4-13 所示，其吸收呈现频率选择性。

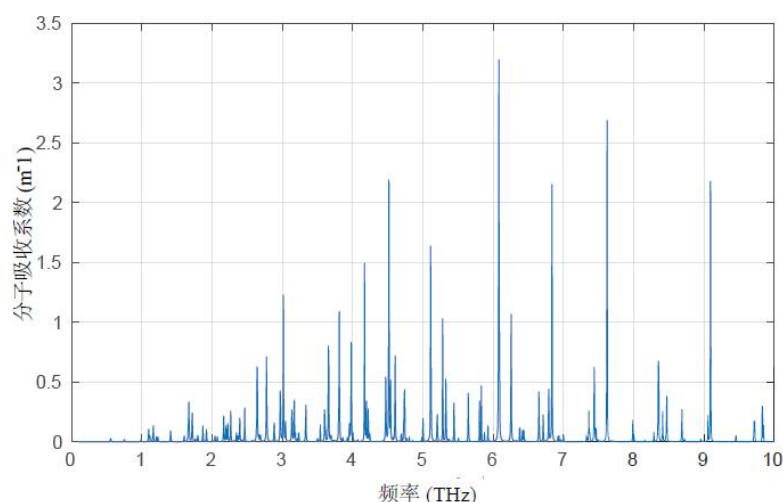


图 4-13 水分子吸收特性

- 2) 太赫兹源：高功率、低成本、小体积、高稳定性的信号源是太赫兹技术能否在 6G 时代得到广泛应用的关键因素。现有太赫兹源的主要类别和对应输出的信号功率范围^{[32][33][34]}如图 4-14 所示。

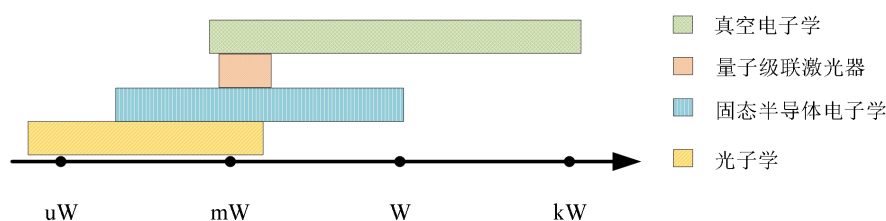


图 4-14 各类太赫兹源的输出功率

其中，真空电子学太赫兹源能产生较高的输出功率并可在室温环境下工作。但是，其在功率容量和能量转化效率等方面存在性能缺陷，尚需进一步改进。其他太赫兹源，或存在体积较大、价格昂贵等缺点，或需要极低温度的工作环境，导致它们难以在无线通信中被广泛应用。

- 3) 基带处理：要实现 Tbps 级别的太赫兹通信，模拟数字转换器和数字基带要有极强的数据处理能力和数据存储能力。实现高带宽、低功耗及面积小的基带处理技术和基带工艺具有很大挑战。
- 4) 太赫兹天线：太赫兹天线需要支持几十或上百 GHz 的超大带宽，同时还必须具备微型化、可集成度高等特性，而这些是当前太赫兹天线无法同时满足的。
- 5) 波形设计：太赫兹波形需具有较低峰均比和较强噪声鲁棒性，以克服太赫兹通信面临的器件性能有限、相位噪声大以及路损严重等问题。另外，太赫兹波形还需要有较强的兼容性，以适应多种应用场景。

- 6) 组网技术：太赫兹通信距离有限，需要设计中继多跳网络来扩展覆盖范围。此外，太赫兹波束窄且数量多，在组网和接入过程中需要设计高效的波束扫描和跟踪算法。

随着全球范围内的 6G 研究启动，各界对太赫兹通信技术的研究不断深入。近年来，太赫兹通信关键器件、芯片等性能不断得到提升，各场景的信道测量、系统测试及演示平台成果日渐丰富。行业对太赫兹的工作也由前期的理论和愿景讨论，逐步向技术验证、芯片器件研发和标准规范制定等方向转移。预计太赫兹通信可以在 6G 时代得到实际且相对广泛的应用，将高速通信体验提升到另一个维度。

4.5 非正交接入技术

前五代移动通信中采用的是正交多址方案（Orthogonal Multiple Access, OMA），具体包括频分多址、时分多址、码分多址和正交频分多址。6G 时代的连接数规模较 5G 时代将有数十倍的增加，非正交多址接入技术（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）在满足大连接数、低时延和高负载等要求方面的潜在优势，使其成为 6G 时代有竞争力的接入候选技术。尤其对于需要满足大范围覆盖和海量连接需求的 mMTC 场景，NOMA 能够充分发挥其优势。此外针对传统大规模 MIMO 在提升频谱效率上的瓶颈，NOMA 也可以在此基础上进一步提升性能增益。

从技术上来区分，NOMA 可以分成三大类：基于功率域的多址方案、基于扩频（码域）的多址方案以及基于交织的多址方案。

- 1) 基于功率域的多址方案的代表性技术是多用户重叠编码（Multi-User Superposition Transmission, MUST）。MUST 的研究起始于 3GPP LTE Release 13^[35]，并在 Release 14^[36]完成了标准制定。其基本原理如图 4-15 所示，小区近端用户和远端用户的信号按照特定的功率比在功率域叠加传输，远端用户传输使用较大发射功率，近端用户传输使用较小发射功率。远端用户可以直接将近端用户的信息当作干扰来处理，但近端用户在解码的过程中需要先解出远端用户的信息，然后获得自己的信息；这被称作串行干扰消除算法（Successive Interference Cancellation, SIC）。

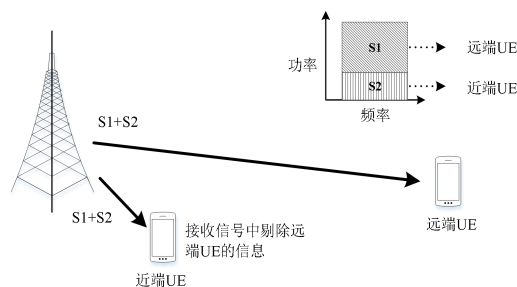


图 4-15 MUST 原理示意图

- 2) 基于扩频的多址方案来自于传统的 CDMA，主要有 MUSA (Multi-User Spread Access)、LDS (Low Density Spreading)、PDMA (Pattern Division Multiple Access)、SCMA (Sparse Code Multiple Access) 和 RSMA (Resource Share Multiple Access)。以 MUSA 为例，MUSA 的主要技术特征是不同的用户采用互相关特性相对较低的复数扩频短序列来扩展用户的调制信息^[37]，如图 4-16 所示。复数扩频短序列元素的实部和虚部可以来自一个多元的均匀分布的实数集合，且序列之间不必正交。然后，借助于基于 MMSE 的 SIC 和解扩频操作，基站可以依次获得各个用户的信息。

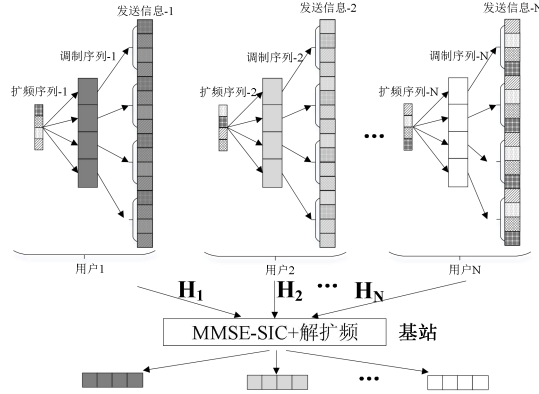


图 4-16 MUSA 原理示意图

- 3) 基于交织的典型方案主要有两种：IDMA (Interleave Division Multiple Access)^[38] 和 IGMA (Interleave-Grid Multiple Access)^[39]。IDMA 和 IGMA 主要依赖于低码率的信道编码和比特级交织器的组合，如图 4-17 (a)所示。不同用户具有不同的比特级交织器来对信道编码后的数据进行交织操作后调制，在数据接收的时候，利用解交织和信道编码的纠错能力来消除各个用户间的干扰。唯一的不同在于，IGMA 还支持符号级交织，也称为栅格映射，即对不同用户的调制符号补零并交织映射到频域资源后再相加，具体原理见图 4-17 (b)所示。

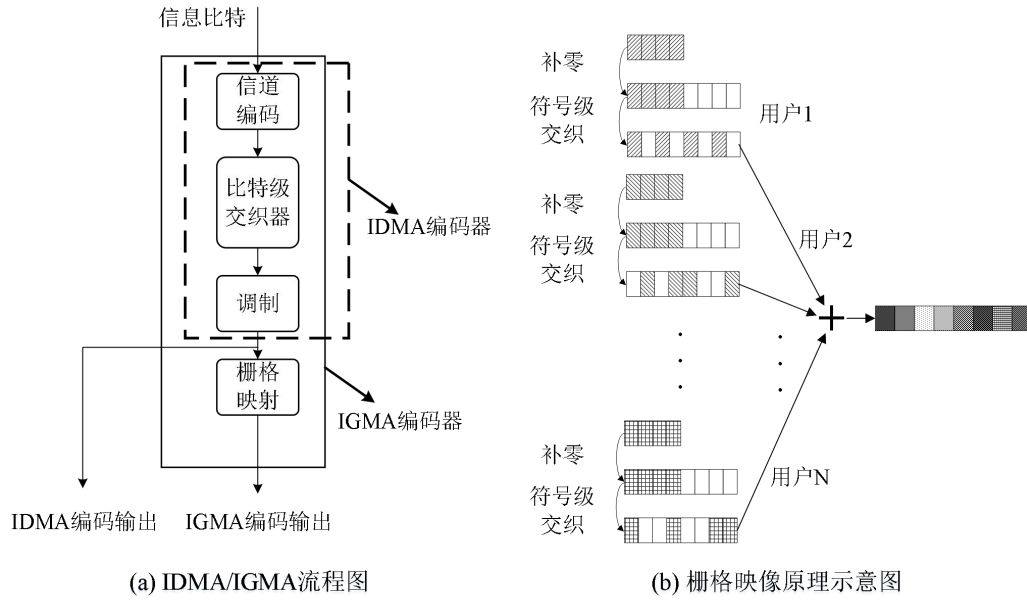


图 4-17 IDMA/IGMA 原理图

以上不同类型的 NOMA 的共同特点是非正交的用户信息传输带来了用户间干扰，且非正交程度越高，消除用户间干扰的复杂度越大。考虑到不同场景下各用户干扰消除能力存在差异，设计相应的最优功率分配方案、扩频方案和数据交织方案是 NOMA 的关键挑战。同时，NOMA 的性能依赖于精准的信道状态信息以及高性能、低复杂度的用户间干扰消除算法。最后，针对不同技术在接入流程上的优化，如与免授权接入的结合也是一个重点。

此外，NOMA 能够克服卫星通信覆盖范围广、终端接入数多、频带有限、用户数量易过载等问题，从而满足天地一体化网络中海量终端的接入需求。但由于卫星通信系统主要以视距直传链路为主，且是一个资源受限系统，星上功率和处理能力有限，接收机的复杂度不能太高。

图 4-18 (a)给出了低轨卫星通信上行传输中，接收机采用 MMSE-SIC，在信道时延扩展为 300ns 时过载 150%的 OMA/NOMA 的 BLER 性能对比曲线^[40]。当 BLER 为 0.1 时，MUSA 和 PDMA 相对于 OMA 获得 3.5dB 和 3dB 增益。图 4-18 (b)给出了低轨卫星通信下行传输中，一对用户 MUST 和 OMA 在不同频谱效率下的 BLER 性能曲线^[40]，可以看出在频谱效率分别为 1bps/Hz 和 1.5bps/Hz，BLER 为 0.1 时，MUST 相对于 OMA 获得 2.5dB 和 2dB 增益。

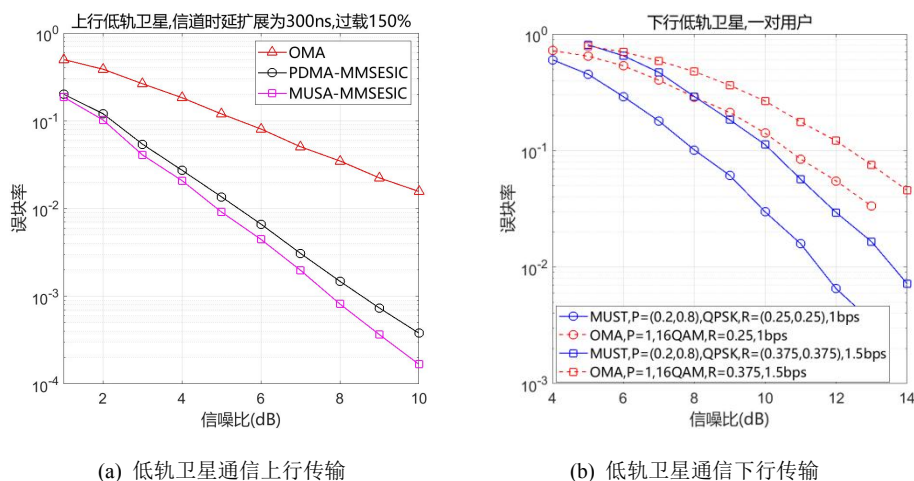


图 4-18 低轨卫星通信上/下行传输性能比较

6G 对海量连接的性能要求方面相比 5G 预期还会有大幅提高，而多址接入技术作为每一代移动通信系统的基础，在 6G 研究中仍有很大的发展空间。经过学术界以及工业界的多年技术积累沉淀，多址接入技术也已经初步形成一些大类方案，有望在 6G 时代形成重大的基础性能突破。

4.6 终端直连技术

■ 直连通信技术

从 3GPP NR Release 17 开始，具有高吞吐量、低时延、高可靠性需求的商业应用场景成为直连通信主要目标用例。6G 时代，直连通信将应用到更多的通信用例以及更多的垂直行业。例如，通过提供极高吞吐率、超低时延以及超高可靠性支持的直连通信链路，满足沉浸式云 XR、全息显示、远程触觉、车联网（车辆、无人机、飞机、高速列车）、智能工厂和智慧物联网的要求。这些应用都需要 Tbps 级传输速率、亚毫秒级延迟以及 10^{-7} 量级的传输错误率。

在 6G 直连通信链路上，可能的潜在候选技术包括：

- 新型频谱技术，如太赫兹通信技术；
- 增强 MIMO 技术。当前直连通信仅支持两发两收。随着 MIMO 阵列天线的持续演进，增强的超大规模天线 MIMO 的应用可以进一步获得直连通信链路上的阵列增益、分集增益、复用增益和干扰抵消等；
- 全双工技术。当前直连链路工作在半双工模式下，半双工模式不仅限制了直连通信数据速率上限，还降低了资源感知的可靠性。未来可以考虑在 6G 直连通信链路引入子带全双工甚至同时同频全双工技术，在提升系统速率的同时，还可以获得更多的候选资源；

- 进一步支持物联网 IoT（Internet of Things）场景。支持低能力直连通信终端，并支持不同能力终端之间通信；进一步增强节能机制，实现直连链路通信超低功耗。

■ 直连蜂窝融合网络技术

一方面，高频技术如太赫兹通信技术，天然地可以提高数据传输速率；另一方面，高频通信具有路径损耗更大、阴影衰落更严重的特点。以太赫兹为例，为了能稳定提供超高速率的数据通信，传输距离通常要求控制在 100m 范围内^[41]。

严重的路径损耗和阴影衰落驱动了超密集无线网络节点部署的需求。然而，现阶段这样的需求却难以实现。其中最主要的是出于对商业上的可负担性的担忧。在人口密度最高的发达城市当中，目前的付费用户密度带来的收益都还不足以覆盖如此密集的网络节点的部署成本和运营成本^[42]。

通过将直连通信网络融合到蜂窝通信网络中，可以提高蜂窝通信网络覆盖率。由于高频的快速衰落，频谱可以在不同链路之间复用，系统容量亦可以得到提升。

如图 4-19 所示，直连蜂窝融合网络技术通过多跳中继，实现覆盖扩展。基站的数据和信令通过多个中继到达终端，终端的数据和信令通过多个中继到达基站，中继负责数据和信令的路由和转发。潜在的技术方向包括多跳中继发现、多跳中继选择、路由选择机制等。

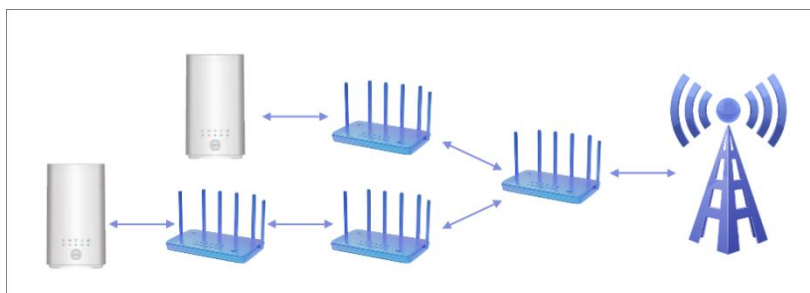


图 4-19 多跳直连蜂窝通信网络

如图 4-20 所述，直连蜂窝融合网络支持多链路通信，终端通过两条以上的路径接入基站，基站的业务数据和信令可以通过多个路径传输到终端，终端的数据和信令可以通过多个路径传输到基站，从而可以提高单个终端的数据速率和可靠性。

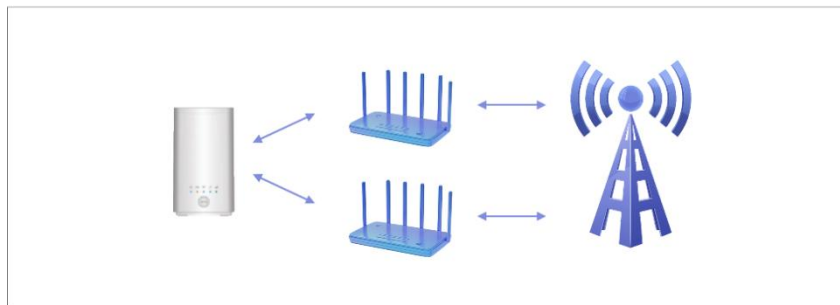


图 4-20 多路径直连蜂窝通信网络

直连蜂窝融合网络还需要考虑终端和中继节点的移动导致链路拓扑发生变化，需要设计机制实现快速和高效的链路转换和恢复，以实现尽可能短的中断时延，保证业务连续性。

■ 终端直连协作技术

通常来说，受壳体的体积限制，单个手持终端或可穿戴设备的能力是受限的，例如可集成的天线数量和传输功率。另一方面，单个终端的可靠性也是受限的。在终端直连协作技术中，终端通过直连通信技术连接到另一个终端，另一个终端可以作为当前终端能力的扩展，以及当前终端的备份。

终端能力扩展：可能的应用场景包括智能手表、智能眼镜通过直连链路获得智能手机的协作，智能手机通过直连链路获得智慧交通工具（汽车、飞机、轮船等）的协作，以突破单个终端的传输功率限制以及天线数量限制，增强其通信性能，以满足 6G 应用场景，如沉浸式 XR 的 QoS 需求。

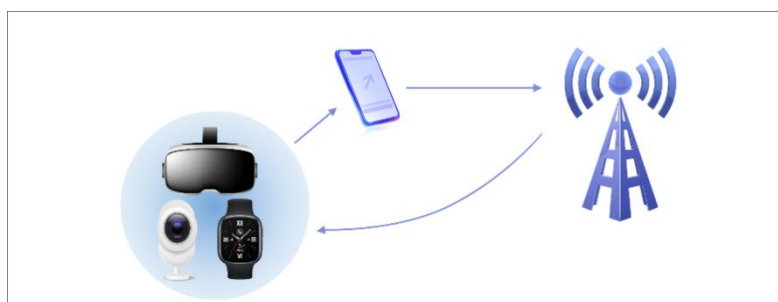


图 4-21 终端能力扩展

终端备份：适用于有超高可靠性需求的工业场景，如智能电网故障检测、智慧工厂机械臂远程操作等。通常分为热备份和冷备份。热备份中，协作终端需要一直在线，被协作终端和协作终端传输相同数据。冷备份中，协作终端正常态下不在线，当被协作终端发生异常，需快速切换数据传输链路。

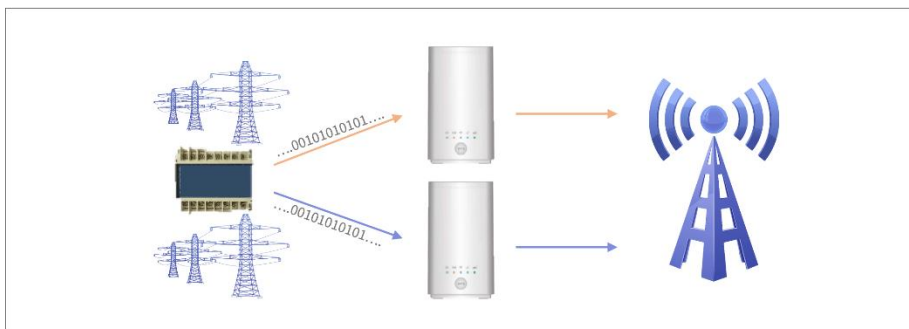


图 4-22 终端备份

和直连蜂窝融合网络技术不同，终端直连协作技术中的协作终端和被协作终端通常为绑定关系，因此不需要考虑协作终端和被协作终端的移动导致的协作终端发现、重选等问题。另外，针对终端备份场景，在保证安全性和可靠性的基础上，需要考虑冗余传输对无线资源带来的负担，优化网络调度机制。

4.7 低功耗通信技术

为了满足 6G 时代万物互联的需求，低功耗通信的需求应运而生。将万亿设备连接起来，不仅需要充足的管道，更重要的是每个连接本身需要具备低功耗、低成本和低复杂度的特性，以适配各行各业的需求。

低功耗通信的使用场景可主要分为四类：

- (1) 标签识别：对标签识别后及时进行资产管理等，以仓储、物流等为代表；
- (2) 传感器数据上报：针对传感器数据进行上报，达到检测的目的，以家庭危险、畜牧业等为代表；
- (3) 目标跟踪定位：跟踪目标物的方位，以智能家居、物品找寻为代表；
- (4) 执行器：它负责在物联网环境中控制或采取动作，例如打开和关闭电灯。

综合低功耗通信的需求和应用场景来看，主要涉及能量收集、射频和基带的功耗降低技术和广域覆盖提升技术。能量收集是解决低功耗的能量供给，他不需要依赖外部的能源供给



图 4-23 低功耗应用场景

而是依靠自身的能量收集。射频和基带的功耗降低是降低设备的使用功耗，达成低功耗的需求。广域覆盖提升技术是从低功耗的使用场景来看，未来低功耗技术需要使能万物互联，因此，低功耗技术需要能够提供广域覆盖以满足越来越多的场景需求。

■ 能量收集技术

传统终端的能量源自外界电源和电池，需要人工充电或者更换，成本较高。因此，低功耗场景下可考虑能量收集的方式解决供能问题，不仅可以降低硬件成本还可以降低维护的人工成本。主要的能量采集技术包括^[43]：

- **射频能量采集：**

射频能量采集的原理通常是通过整流器将专门的射频源或者环境中的射频源信号的能量转换成直流电压，并通过电源管理电路储存起来，再对标签的其它设备进行供电。环境中的射频源可以是移动通信基站、电视塔、WiFi 路由器等。

- **环境光能采集：**

环境光能量采集技术的主要原理是利用光伏效应来收集太阳能。光伏效应是指半导体材料在吸收太阳光照射下，会产生光生电效应的现象。这个效应指当光子在半导体材料内被吸收时，会释放一个电子，并使其从价带跃迁到导带。在产生电流和电压的过程中，将光能转化成电能。

- **热能采集：**

热能转化原理是基于热电材料的赛贝克效应，根据两个不同导体接合处的温度差而产生电压。一些可穿戴设备在探索使用热能采集技术，将人体作为发热端，环境作为冷的一端，高低温度之间的差值决定产生的能量大小。

- **振动能量采集：**

机械能广泛存在于桥梁、楼宇、车辆、机器、家电等场合，机械能技术可以通过多种方式进行能量转换，如压电转换、静电转换和磁电转换等。其中，静电转换方式是借助静电感应将机械能转化成电能；压电转换方式是通过压电效应发电，借助初始的电压差进行设备供电的能量转换；磁电转换方式通过振动使导体切割磁感线产生能量。

以上不同的收集方式的条件和收集能量效率差异较大，需要研究合理的能量收集方式。另外，为了更好进行能量收集，还需要研究配套的能量存储和能量管理技术，目的是提供最优的能量供给。

表 4-4 能量采集技术对比

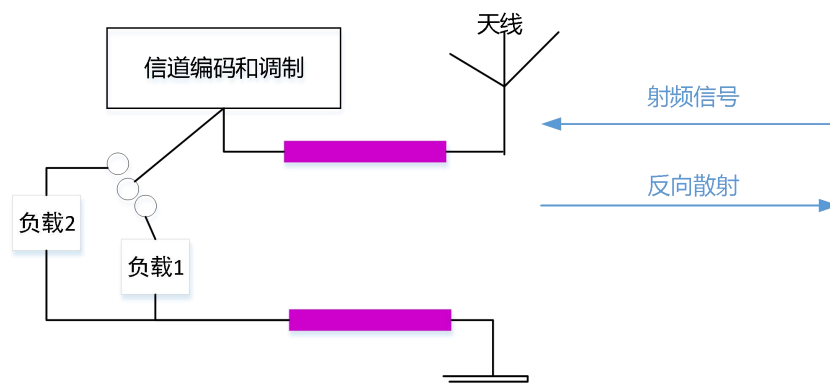
能源	技术	功率密度
太阳能	光伏电池	10-100mW/cm ² (室外) <100uW/cm ² (室内)
射频	天线	0.01-0.1uW/cm ² 1-10mW/cm ²
人体热量	热电	<35uW/cm ²
机械能	压电	4-250uW/cm ²
	磁电	300-800uW/cm ²
	静电	50-100uW/cm ²

■ 射频低功耗技术：

射频模块的功耗在整个设备中占比极大，因此，如何降低射频模块的功耗是设备能耗降低的关键。射频模块包含发射机和接收机两个部分，发射机的降功耗通常采用反向散射机制，而接收机的降功耗则通常采用低复杂度的接收机，例如，基于射频能量检测的接收机。

• 反向散射

反向散射的好处是设备本身不需要产生信号，而是将自身信息调制到激励信号上，这样可以极大降低设备的复杂度和成本。反向散射技术基本通信原理是：标签通过负载调制等方式将信号加载到接收到的无线激励射频信号上，再通过反射这个射频信号传递信息，而标签自身不产生射频信号。例如，通过反射和不反射收到的无线信号来表示 0 和 1 这两种状态。



反向散射的类别包括：单站反向散射，双站反向散射和环境反向散射。单站反向散射指的是传统的读写器和标签之间的反向散射，即读写器产生并发送一个射频信号，而标签接收并反射回读写器。双站反向散射指的是在标签附近设置一个专门的载波发生器，载波发生器发送固定载波，标签收到后加载自身信息并反射给读写器。环境反向散射指的是标签利用周围已有的无线信号和读写器进行通信，即标签将信息加载到收到的周围已有的无线信号上并

将其反向散射给读写器。

基于上述架构下，特别是后面两种架构，业界提出了很多的新型反向反射方案。例如，2016 年提出的转型反向散射技术（Inter-Technology Backscatter）通过改变标签的阻抗，将蓝牙信号的频率搬移至 Wi-Fi 信号或者 ZigBee 信号的频带，扩大了反向散射通信的应用范围。2017 提出的基于 LoRa 的反向散射技术，利用 chirp 的扩频技术实现了远距离反向散射通信，通信距离最远可达 475 m。其它的还有全双工方向散射、并发反向散射等。

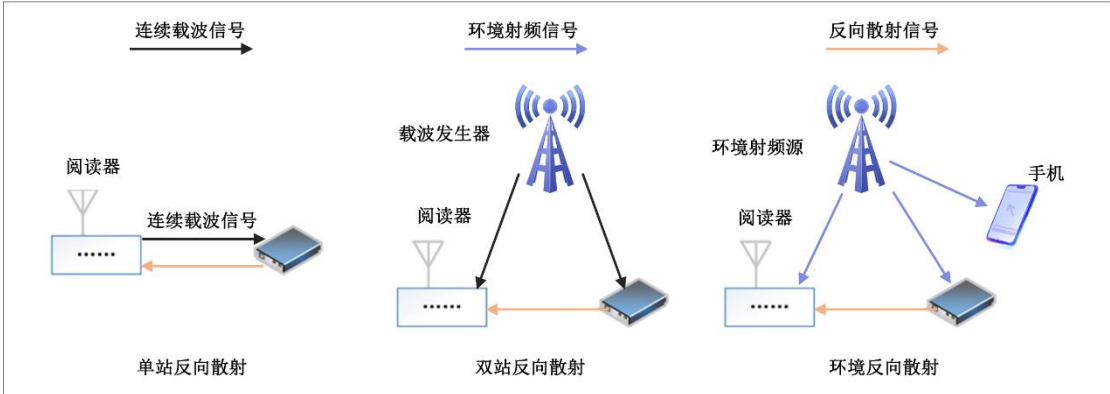


图 4-25 反向散射类型

- **低功耗接收机**

低功耗接收机通常采用非相干检测的方式，降低整个接收机的复杂度和功耗，功耗可降至微瓦级。大体可分为射频包络检测、基带包络检测和中频包络检测三种方式。

■ **基带低功耗技术：**

基带的功耗和复杂度取决于系统的基础设计相关，系统的设计主要关注以下方向：

- **帧结构设计**

传统的帧结构设计更多的兼顾了时延敏感业务需求，而忽略了对功耗及其他方面的特征匹配。因此，低功耗通信在设计帧结构时，可更多从降低功耗和成本的角度出发，而将时延的优先级降低。

- **信道编码**

采用信道编码能有效增加传输距离和散射通信的可靠性，但码字一般应足够简单，以简化基带和接收机的设计。例如，信道编码通过采用曼彻斯特、FM0、反向不归零等简单的编码方式，可以极简基带设计^[44]。

- **调制**

调制通常采用 ASK（Amplitude Shift Keying，幅移键控）、PSK（Phase Shift Keying，相移键控）、FSK（Frequency Shift Keying，频移键控）等简单调制方式，一方面可以匹配反向散射的简单负载调制，另一面可以使接收机采用低能耗和复杂度的非相干解调方式，显著降低成本。需要注意的是每一种调制方式都具有相应的优势也有相应的缺点，在系统设计和实现时，需要根据实际情况选择最适合的调制方式^[44]。

■ 广域低功耗场景的适配技术

• 覆盖提升技术

现有的 RFID 等用于低功耗场景的技术，覆盖距离非常短通常只有 10m 左右，极大的限制了低功耗场景的使用。未来需要考虑将覆盖和蜂窝网络相当，即室内 30~50m，室外 300~500m，一方面可以充分满足不同场景下的需求，另一方面，可以最大化利用现有的网络设施，降低部署成本。而当前蜂窝网络的 RSRP 的水平需要低功耗通信在标准设计上需要考虑上下行覆盖提升的技术。

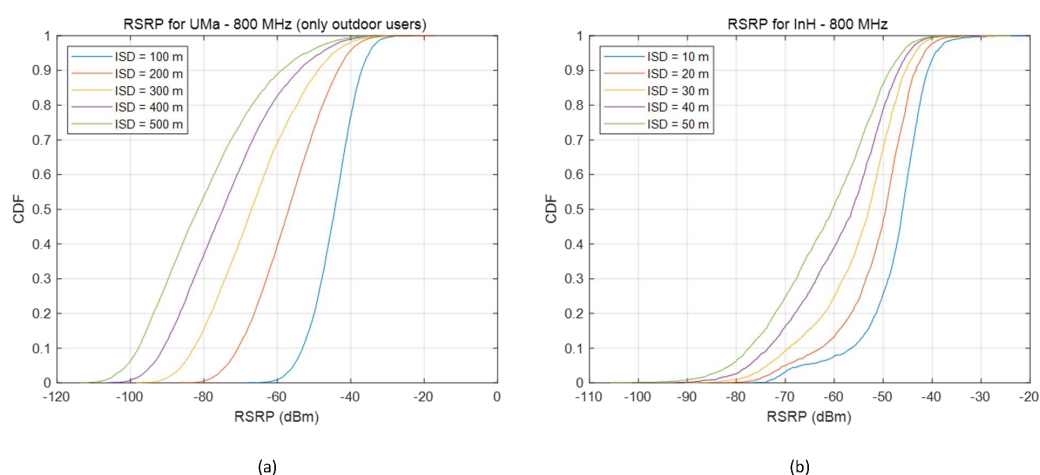


图 4-26 室内外不同站间距下的 RSRP 仿真

覆盖提升技术大体可以分为三类：一是通过架构上提升，例如，可通过收发分离的架构、Relay 架构等提升覆盖；二是通过物理层技术提升覆盖，例如，可通过重复、扩频、分集等技术提升覆盖；三是通过提升设备本身的灵敏度，例如，在设备中增加放大器等器件可显著提升灵敏度。

• 干扰管理技术

无线通信是干扰受限的系统，如何进行干扰管理一直是核心问题。例如，可采用波束赋形技术降低干扰，原理是通过控制不同天线阵元上的馈电和天线阵元排列的空间结构，调整信号的相位、振幅，使得最终形成的无线信号功率集中于指定的方向上，在其他方向上无线信号功率很小，从而降低了干扰。也可以通过基站间的信息交互，使得基站间可以调度错开

干扰严重的标签设备，降低系统下的干扰。也可以利用传统下的随机化干扰、正交扩频机制等降低干扰。

低功耗技术未来在物联网中具有非常重要的应用价值，同时也面临诸多技术挑战。未来商用成功与否的关键取决于低功耗技术的实质突破，实现将功耗及成本降至用户可接受的范围并被广泛应用到各行各业中。

4.8 通感一体化技术

感知的概念非常宽泛，其范畴可以包含如：图像感知、全息感知、加速度感知、位移感知、天气感知、呼吸感知、心率感知、血氧感知、压力感知等^[45]。与此同时，伴随着通信领域在 5G/6G 阶段踏足更高的频带资源，如毫米波/太赫兹，与传统的感知功能所用的频带发生了更多重叠。此外，大规模 MIMO 的技术演进以及全双工技术的持续进化也赋予了通信感知一体化联合设计的技术支持。考虑到硬件成本、资源共享、性能互助等因素，通信感知一体化的联合设计理念也就成为大势所趋。

通信与感知一体化的未来发展可以根据二者的融合程度分成三个阶段：

- 第一阶段：简单的业务层级的共存。在一个设备内同时实现通信与感知功能，此外还能对二者的相互干扰进行有限的干扰管理。
- 第二阶段：通信与感知实现能力互助。具体来说，可以实现联合的收发算法，统一的波形设计，还可以在一些功能层面，如 CSI 预测、波束管理等方面实现互惠互利。
- 第三阶段：在硬件、软件、资源层面实现深度的一体化联合设计。

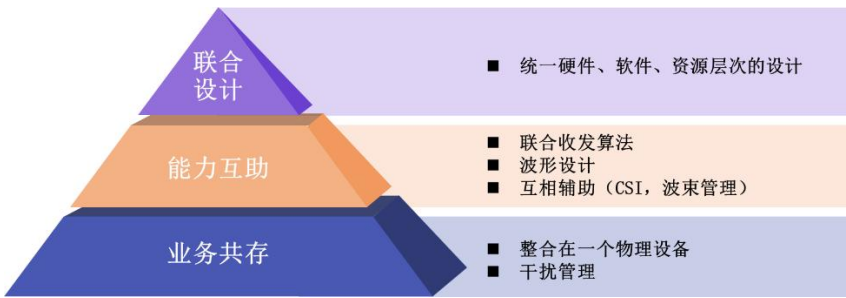


图 4-27 通信感知一体化发展预测

未来通感一体化的设备主体可以是基站，终端或者二者混合模式。具体来说，可以有单一主体的单站式感知以及多个主体的多站式感知方式。单站式感知对于感知设备本身的要求较高，一方面对器件方面有较高的要求，例如功率放大器(Power Amplifier, PA)的线性范围、干扰抑制能力以及能耗，另一方面对于接收算法也有着更高的要求。相比于单站感知，协同感知或者多站式感知有着易于实现的优势，会是未来通感网络的重要组成部分。此外，网络

内有限的算力除了要服务感知业务还要支持传统的通信业务。需要研究如何合理分配网络中的算力资源，使其能够与感知业务以及通信业务相匹配。

对于同时承载了通信与感知功能的一体化网络，干扰的建模会变得更加复杂。传统的小区通信干扰依然存在，但是额外的会添加很多新的干扰类型。例如感知信号之间的相互干扰、感知对通信的干扰以及通信对感知的干扰。如果考虑到发送通感信号的主体还需要按照网络侧和用户终端来分类，那么整个通感网络的干扰管理会变得更为复杂。针对繁多的干扰类型，如何进行分类干扰测量以及执行相应的干扰处理方案将会是通感一体化网络的一个挑战。传统的干扰测量与干扰管理可能不会再适用于通感一体化的网络，借助 AI 来进行复杂网络的干扰预测/管理会成为一个有前景的方向。

此外，通感一体化设计也会对终端设备带来一些挑战。例如，如何在终端设备自身功率受限的情况下，同时满足通信及感知业务的需求。还有，主体为终端的单站式感知，对于自干扰消除及杂波干扰消除的技术要求比较高，如何设计高效低复杂度的终端干扰消除算法也是尚待解决的问题之一。此外，考虑到通信与感知的需求不一样，如何根据差异化的需求进行一体化的天线设计也会是未来的重点课题。

在可以预见的未来，通感一体化的研究会从 5.5G 一直延续到 6G^{[16][17][46]}。综合来看，面向通感一体化的技术难点主要有以下几个方面：

- 1) 波形设计：传统用于雷达感知领域的波形有脉冲波形、FMCW 等。这类波形的优点是对全双工要求低，且信号处理简单，成本较低，缺点在与相比于 OFDM 类波形承载信息的能力较弱。OFDM 波形以及 OTFS 波形在同时兼具承载信息与感知探测的能力上优于传统雷达波形，但是在自发自收的感知场景下对全双工的要求较高。

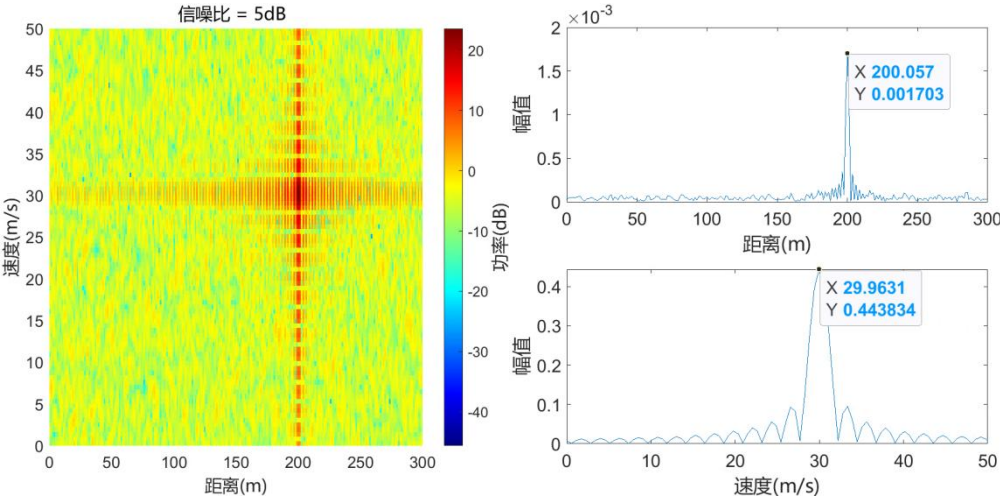


图 4-28 基于 OFDM 波形的感知结果展示

- 2) 帧结构设计: 需要研究如何将感知所需要的时域资源信息嵌入到传统的通信 TDD 时隙资源配置中。此外, 也会根据单站与多站式感知的不同需求确定所需的帧结构设计方案。
- 3) 资源复用方式: 通信资源与感知资源的复用方式可以有多种, 例如 TDM、FDM、SDM、CDM。从实现的难易程度来看, 通感一体化的初始阶段可以只考虑 TDM 或者 FDM 的方式。
- 4) 感知信息的测量及反馈: 原则上对于感知信息的测量与反馈可以参考现有通信系统中的信道状态信息反馈流程, 可以作为一个全新的测量参数。
- 5) 感知模式选择及切换: 通感网络具备丰富灵活的感知模式, 包含自发自收、协作感知等模式, 实现终端、基站、核心网设备等多网元有机组合的网络化感知。在感知任务的配置过程中, 选择合理的感知模式是需要解决的问题, SF 或 RAN 可根据不同的感知场景和业务需求以及终端的辅助信息, 选择合适的感知模式。
- 6) 感知能力定义: 在感知设备的选择中需考虑感知设备的感知能力, 感知能力可包含支持的感知业务类型、感知模式等。其中, 终端在不同 RRC 状态下可具备不同的感知能力。
- 7) 感知设备选择: 感知设备的选择可基于感知业务的需求、感知设备的能力、感知设备位置、网络负荷、授权/鉴权等信息选择出合适的感知设备, 感知设备的选择可由 SF 或 RAN 来执行。终端和 RAN 可上报辅助信息用于感知设备的选择。
- 8) 感知数据收集架构: 感知数据的上报需要考虑减少对通信业务的影响, 可设计统一的感知数据收集架构来覆盖各种场景。感知数据可通过信令承载或数据承载上报, 可支持本地化的感知数据上报。
- 9) 移动性管理: 在感知设备的移动场景和被感知物体的移动场景, 需保证感知业务的连续性。当感知设备进行切换时, 感知设备的源基站选择支持该感知业务的目标小区作为切换的目标小区, 并在切换准备流程中将感知业务信息发送到目标基站。被感知物体移动时, 感知设备需及时检测和上报到感知任务的控制网元, 感知任务的控制网元可选择其它感知设备执行该感知任务, 从而保证感知业务的连续性。

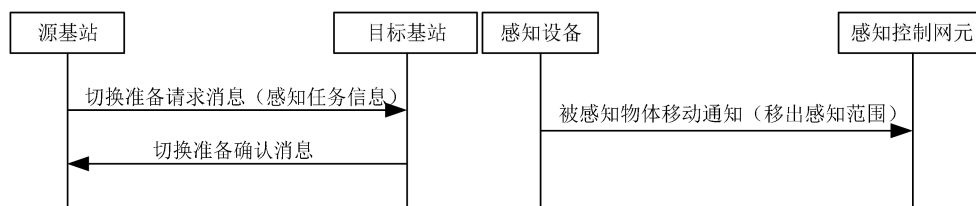


图 4-29 通感移动性管理示意图

尽管通感一体化设计有着广阔的应用前景，但是无论从硬件层面还是算法层面，甚至理论层面都还有很多尚待解决的技术问题。未来通感一体化的发展也会预期从初步的简单融合慢慢向着深度融合的程度逐步演进。

4.9 AI 辅助通信技术

在无线通信中，很多问题无法建立直观的数学模型或者无法轻松找到最优解，而基于数据驱动的 AI 算法利用大量数据，通过 AI 模型的训练可解决无法构建数学模型的通信问题，基于模型驱动的 AI 算法则可辅助构建的数学模型，最终找到最优解。具有强大的特征提取和快速寻找优化解的能力的 AI 算法可应用于多项 6G 核心技术的优化设计中。本节将从物理层优化和高层优化两个角度详细阐述。

■ AI 辅助通信物理层优化

AI 辅助通信物理层优化主要有两种方式：端到端联合优化和单侧优化。如图 4-30 所示，端到端联合优化是指发送端和接收端的对应模块可以利用 AI 技术实现端到端设计，主要包括多模块联合端到端优化以及单模块端到端优化；单侧优化主要包括基于 AI 的 CSI 预测、波束管理、定位、信道估计、MIMO 信号检测和信道解码等。

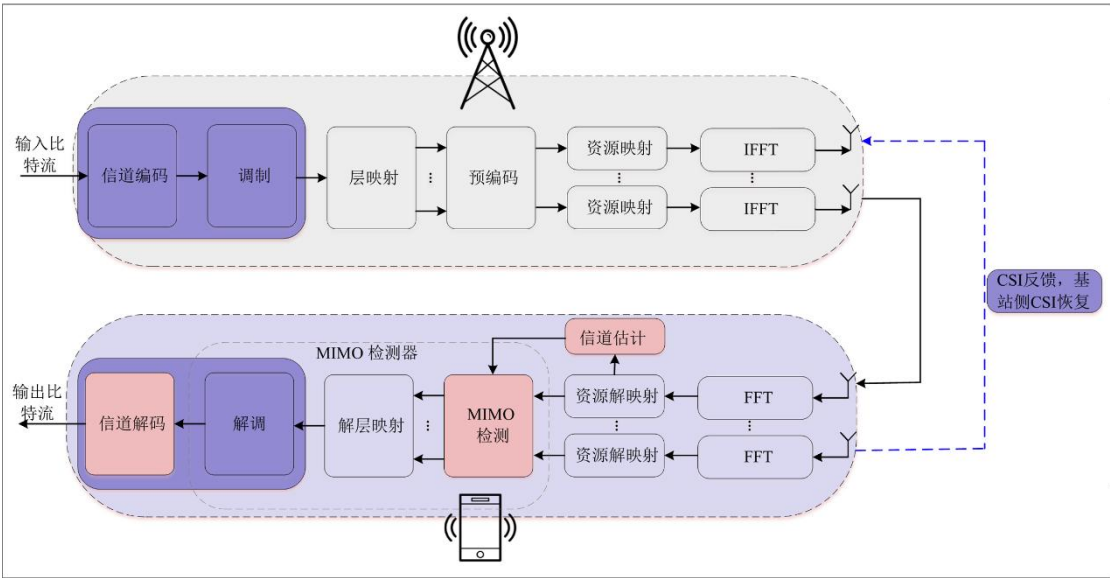


图 4-30 AI 辅助通信物理层优化

● 端到端联合优化

多功能模块的联合优化：AI 算法还可以对收发链路上的多个对应功能模块进行联合优化。例如，应用两个神经网络分别替代发送端的信道编码调制模块和接收端的信道解码解调模块，以避免传统多模块拼接带来的高复杂度和大计算量。或者，用 AI 的端到端算法实现

整个发射机和接收机，如图 4-31 所示，组成基于自编码器的全局收发机。自编码器采用端到端优化方法同时优化发射机和接收机的神经网络，发射机通过神经网络生成待发送信号，接收机通过神经网络重构接收信号[47]。

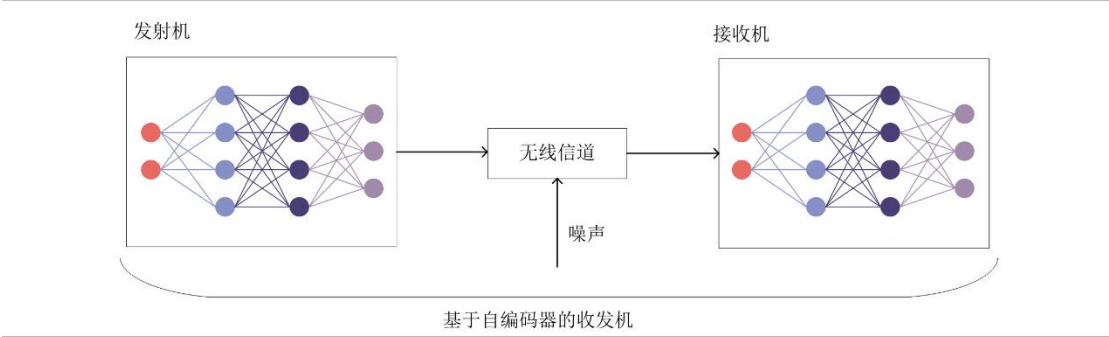


图 4-31 基于自编码器的收发机示意图

自编码器相当于对通信物理层模块重构，可减少参考信号和控制信息开销，带来更高的传输效率。目前自编码器是在给定的信道环境中离线训练完成。实际部署中，信道环境随时间推移而变化，自编码器的在线训练和 fine-tuning 等其它技术在实际部署中尤为重要。此外，自编码器缺乏传统收发机模块的可解释性，设计者无法知道哪些网络层之间的什么样的连接会更影响自编码器的准确度，如何设计可解释性的自编码器有待进一步探索。

单模块端到端优化：图 4-30 所示的收发链路中有多个模块可以利用 AI 算法进行联合设计优化，如信道编解码模块、CSI 反馈和恢复模块。以 CSI 反馈和恢复为例，在终端侧利用 AI 算法将 CSI 做压缩，在基站侧利用 AI 算法恢复压缩前的 CSI[48]。应用 AI 算法可最大程度地在基站侧还原实际信道特征。目前，基于 AI 的 CSI 反馈和恢复算法在业界也有了较多探索，且初步认为其有较大的增益。如图 4-32，采用了具有 Encoder-decoder 结构的 Transformer 模型，使用 Dense urban 场景的数据集训练模型，并在 Dense urba 场景下给出了 AI 算法相比于 Release-16 eType II 码本获得的用户感知吞吐量（User Preceived Throughput, UPT）增益，相比 Release-16 eType II 码本，在同等反馈开销下，AI 算法可获得最高 15% 左右的 UPT 增益。

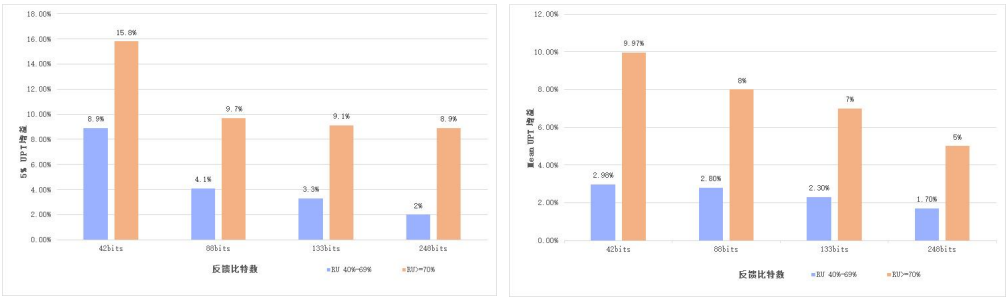


图 4-32 基于 AI 的 CSI 反馈和恢复

- 单侧优化

CSI 预测：基于一个历史时间窗内的 CSI 信息，利用 AI 算法来预测未来的一个或者多个时刻的 CSI，从而提升 CSI 的准确性。但 AI 算法对移动速度的泛化性问题不能忽视，如表 4-5 所示，给出了 AI 算法在移动速度为 10km/h，30km/h 和 60km/h 下的泛化情况，用平方广义余弦相似性（Squared Generalized Cosine Similarity, SGCS）表示 AI 预测的 CSI 信息与标签的相似程度。从表 4-5 中，可看出，在高移动速度下，AI 算法的泛化性能并不好，如何提升 AI 算法对移动速度的泛化性需要进一步探究。

表 4-5 基于 AI 的 CSI 预测泛化性验证

	推理: 10km/h	推理: 30km/h	推理: 60km/h
训练: 10km/h	0.9919	0.7465	0.5426
训练: 30km/h	0.9804	0.9182	0.6484
训练: 60km/h	0.9707	0.8625	0.8302
训练: 10, 30, 60km/h	0.9816	0.8979	0.8137

波束管理：高速数据传输需要收发波束的精准对齐。AI 算法可以根据不同地理位置进行波束训练，确定最优收发波束。相比传统复杂的波束训练方式，AI 算法可以根据少量波束信息恢复出全部波束信息，或者根据历史波束信息预测将来的波束信息。因此，可减少参考信号的开销，提升波束选择准确性，更加适应高速移动场景。

定位：非视距传输（Non Line-of-Sight, NLOS）场景和基站间同步误差会影响定位精度。AI 算法通过对采集的大量数据训练学习，包括 UE 与单 TRP（Transmit and Receive Point, TRP）和多 TRP 之间的信道测量信息，可提取传统定位算法无法获得的特征，降低定位误差。基于 AI 的定位可以分为 AI 辅助定位和 AI 直接定位两种方式，前者利用 AI 算法生成 LOS/NLOS 指示信息、到达时间（Time of Arrival, ToA）、到达角（Angle of Arrival, AoA）、出发角度（Angle of Departure, AoD）等，后者则直接利用 AI 算法获得位置信息。但是，未来 AI 定位技术的研究需聚焦于设计对环境改变不敏感的算法。

信道估计：基于 AI 的信道估计可以通过对导频所处时频位置的信道进行训练学习，估计出导频和数据的时频位置的完整信道，从而大大提高信道估计准确度^[49]。基于 AI 的信道估计算法的高复杂度和各种信道条件的泛化能力是需要重点解决的问题。

MIMO 信号检测：基于 AI 的 MIMO 信号检测的一种简单实现方式是利用 AI 算法直接取代传统的信号检测算法，但此种数据驱动的实现方式在高阶调制下算法复杂度较高。另一种模型驱动实现方式是用 AI 优化传统信号检测算法，如在传统算法中添加一些可训练的参数，提高算法的灵活性以及信号检测性能。

信道解码：与基于 AI 的 MIMO 信号检测类似，基于 AI 的信道解码也可分为两种。一

种是基于 AI 算法直接构造信道解码器的数据驱动，利用 AI 算法对接收数据流进行监督训练以实现高精度解码。但是，随信息比特增加，AI 算法复杂度将呈指数级增加。另一种是优化传统解码算法的模型驱动，如训练基于 AI 算法的噪声估计器，再结合传统译码算法，提高解码准确度。

■ AI 辅助通信高层优化

在高层优化中，考虑跨层、跨域、跨系统的场景和需求，可推动网络智能化进程。

● 跨层优化

AI 功能可整合不同网络层级的信息，使用样本特性更丰富的数据集，提升数据驱动的 AI 算法的性能：

- 1) 终端与网络（终端）间协作：通过应用联邦学习^[50]等分布式学习方法，完成小区级或用户级 AI 模型的训练，使能 AI 通信功能。
- 2) 跨协议层联合优化：跨协议层联合优化将打破传统协议栈架构的功能划分，为 AI 通信功能带来新的增益，如联合资源调度/分配、移动性优化等。
- 3) 接入网和核心网联合优化：收集终端在接入网和核心网的多样化数据，应用纵向联邦学习，训练更符合终端特性的 AI 模型，实现资源灵活调整。
- 4) 操作维护管理（Operation Administration and Maintenance, OAM）优化：通过应用类 GPT^[51]大模型可以使 OAM 实现负载均衡、网络节能等的自动化运维。

AI 功能还具备以下数据处理相关功能：

- 1) 数据收集优化：原始数据通过 AI 算法加密/脱敏后传输，可以降低数据泄露后被译码的概率。此外，应用生成式 AI 模型，学习真实数据的分布特性，可以减少数据传输量；
- 2) 数据传输优化：应用强化学习等方式合理调度资源，实现数据高效传输。此外，通过跨层调度等方式，还可实现数据流的同步传输，保障如沉浸式通信的服务体验；
- 3) 数据监测增强：更智能化的数据测量/上报和预警方法，保障服务的时延等要求。

● 跨域优化

通信域和非通信域的联合优化，可以提升网络服务质量，主要考虑以下两个方面：

- 1) 对外提供网络信息：将通信网络内部信息提供给外部，与外部协作实现对网络性能的优化。边缘服务器基于接收的订阅信息、服务质量要求信息等，执行基于 AI 的

缓存策略调整、资源分配优化等方案，降低端到端通信时延；

- 2) 接收外部信息供给：通信网络可接收外部信息供给，实现配置优化。例如，基于应用服务器提供的流量特性信息，执行 AI 调度增强，保障数据传输和用户体验。此外，通过接收定位传感器的位置信息，可以实现多域定位信息的智能融合，实现更高的定位准确性。

上述跨域优化涉及通信域与非通信域的协作，需要额外考虑数据面和安全面的网元增强，在保障信息隐私性和安全性前提下，实现信息开放和对跨域信息的一致理解。

• 跨系统优化

6G 网络将包括多种网络类型，如 TN 网络和 NTN 网络，此外还存在不同的运营商。协调差异化的无线资源，利用不同网络类型的优势，可以优化用户服务体验。

在星地协同场景中，通过智能化调度，可以将数据动态地分配给 TN 和 NTN 网络，实现资源高效利用，提高网络传输能效。

在多运营商场景，基于终端和不同运营商网络间的信道环境，通过跨运营商的智能化调度协调，可以在空口资源受限下，实现最优的用户体验。

在 6G 网络中，AI 与通信功能的融合将无处不在。从 AI 对物理层的单侧优化和端到端优化，到 AI 在高层的跨层、跨域、跨系统优化，AI 在通信网络具有广阔的应用前景。然而智慧内生的 6G 网络也需要考虑性能增益和成本的平衡。这要求 AI 算法的复杂度能够适应不同场景下的差异化算力资源，同时可以提供高准确率的预测结果。为保障用户体验，实际部署时也要求 AI 具有较强的泛化能力，满足灵活部署、在线更新、永不掉线的需求。

4.10 星地协同传输技术

在空天地一体化网络系统中，星地协同传输可充分发挥空间通信系统广域覆盖和地面通信系统宽带传输的优势，对系统中时间、空间、频率和功率等多维资源进行统一调度，以实现资源的最优化配置。

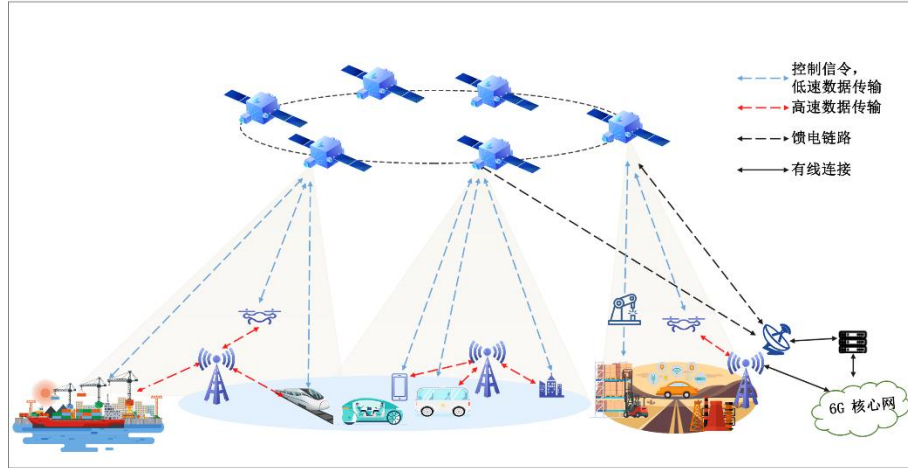


图 4-33 星地协同传输

针对不同的业务场景，星地协同传输有不同的应用模式^[52]。一般来讲，广播信息或小数据包可通过卫星进行传输，而高速数据业务包则由地面移动网络进行传输。通过星地协同实现海量热点内容的广域分发，可以有效缓解地面骨干网的传输压力，提高网络整体传输能效，实现资源高效绿色集约使用。目前，将卫星通信与地面通信有机结合，构建星地协同传输系统，实现未来无线通信全区域、全方位覆盖，是学术界和产业界热点探讨的话题。

地面通信与卫星通信采用统一的网络架构与空口技术是实现星地协同传输的前提。未来 6G 空天地一体化网络系统中的底层关键技术将以 6G 地面网络关键技术为主，通过开展适配性研究，将 6G 地面网络关键技术应用于卫星通信。适配性研究需要考虑抗多普勒能力强、低 PAPR、支持灵活频谱共享等方面的特性。一种典型的星地协同传输实现方式是终端同时与卫星站点和地面站点建立连接，卫星站点与地面站点间可以通过动态接口进行信息交互与资源调度。卫星站点可以作为主小区提供基本信令传输，同时地面站点可作为辅小区提供高速率数据传输。星地协同传输还面临以下主要技术问题：

■ 频谱共享

在传统的频谱资源分配机制中，陆地通信与非陆地通信使用的频段是分离的。在星地协同传输场景中，星地之间共享频谱资源是必然的趋势。频谱共享可分为静态/半静态频谱共享与动态频谱共享两种模式。对于静态/半静态频谱共享模式，可以从空天地一体化网络中的无线传输特点、网络拓扑特点以及业务特点等方面提取有效的信息，设计有效的静态/半静态频谱共享机制。对于动态频谱共享模式，目前主流方案包括基于频谱感知的机会频谱接入以及基于数据库辅助的频谱接入方法。其中，前者基于认知无线电技术自动检测周围无线电环境，智能调整系统参数以适应环境变化，从时间、空间、频率等多维度感知空闲的频谱资源。后者则是通过建立完善的数据库以实现动态频谱共享，通过查询数据库的方式确定一定时间一定区域内空闲频谱资源。

- 干扰协调

干扰协调是实现星地协同传输重要保障。在空天地一体化网络中,存在各种各样的干扰场景。例如,不同网络之间的干扰,相同网络中不同节点之间的干扰,同一节点收发链路之间的干扰等。面对空天地一体化网络的干扰协调问题,可以从以下三个方面展开研究^[53]:

干扰建模:空天地一体化网络存在网络时空拓扑变化快,干扰行为与干扰场景复杂多变等特性,传统的静态分析与描述方式不再适用。未来需要从空天地一体化网络的干扰场景、干扰特征、干扰机理以及多维度的变化关系进行分析建模。

干扰感知:陆地节点与非陆地节点存在非常大的相对运动,这使得干扰环境复杂,干扰信号在时、频、空域等多个维度不断变化。现有的基于某一个域提取特征参数进行干扰感知的方式已经不能满足需求,需要结合网络自身特点及干扰类型进行分析,从多个维度研究影响感知决策结果的因素,建立一套完善的干扰评估体系。

干扰协调方法:结合空天地一体化网络特点以及干扰场景,研究并改进现有传统的干扰协议/抑制方式以适应天地一体化异构网络的干扰协调需求。此外,也可以从通信、控制、AI等多学科融合的角度出发,研究新型智能化的干扰协调方法。

- 星地同步

星地间保持严格同步是实现星地协同传输的必要条件。在空天地一体化网络中,空间节点的位置动态变化,时空尺度极大等特性,给星地之间同步带来了技术挑战。星地之间同步主要包括星地站点之间的同步以及终端与星地站点之间的同步。此外,不同星地链路的时频变化率差异大,终端维持多条星地链路之间的同步带来的算法复杂度与开销较高。

- 移动性管理

星地协同传输过程中,移动性管理是重要的一个环节。在空天地一体化网络中,移动性管理需要解决水平和垂直方向上的移动性问题以及网络节点带来的被动移动性问题。其中,对于水平和垂直方向上的移动性,首先需要考虑垂直方向上的移动性如何进行表征,另外还需要考虑如何融合水平方向上的移动性问题。不同的表征方式中,移动性的管理策略也会略有不同。对于网络节点带来的被动移动性问题,需要终端设备具备一定网络覆盖判断的能力,以保证业务的连续性。同时要求网络协助终端应对网络节点带来的被动移动性问题,辅助终端进行测量,完成小区选择重选、切换等。

此外,在空天地一体化通信系统中,卫星节点的位置高速变化,星地之间的信息交互时延较大且动态变化,鲁棒性难以保障。卫星通信信道的衰落特性也有别于地面通信信道,例如,在莱斯卫星移动信道中,存在大量的直射分量,直接使用地面传统的协同传输技术不能获得优异性能。

星地协同传输带来的性能增益与系统开销之间的折衷也是决定其能否成功应用的首要因素。只有解决上述问题，星地协同传输才能在空天地一体化网络中实际应用，提升系统资源利用率，充分发挥地面通信系统与非地面通信系统的优势，实现资源的最优化利用。

4.11 以用户为中心的接入技术

基于上一章节对以用户为中心的网络构架的需求分析，在考虑满足 6G 多样化业务场景的用户需求，同时不增加网络架构设计复杂度的情况下，具体分析以用户为中心的接入网架构。

■ 以用户为中心的接入和管理

根据以用户为中心的设计理念，接入网侧可以考虑控制面和用户面的分离^[54]：通过低频段小区实现广覆盖，小区的控制节点主要提供用户控制面的服务，可以作为用户 RRC 功能的锚点，为用户提供接入服务和移动性管理；而不同位置下接入点子集内不同接入点为用户提供用户面服务，实现面向用户的数据传输。可以参考图 4-34：

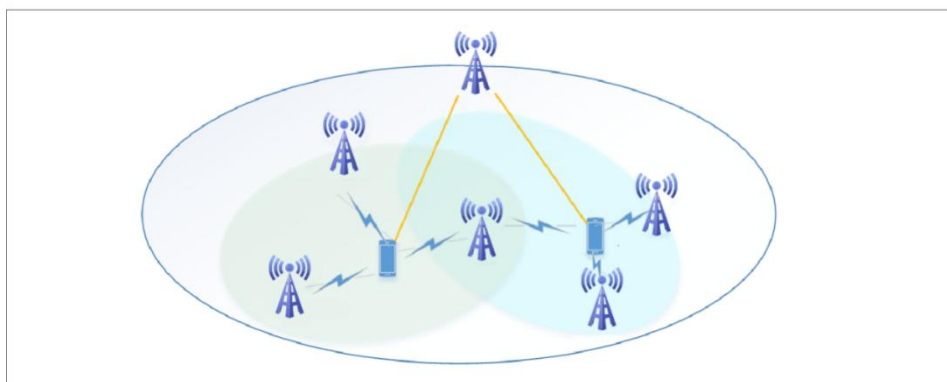


图 4-34 控制面和用户面分离

这种构架的好处在于，广覆盖的信令控制节点可以避免用户的移动而造成频繁的切换，为用户提供更好的移动性管理，同时也可根据用户的位置预测和协调不同接入点子集为用户提供服务，从而保证用户在移动场景下的高性能；而接入点也可按需生成，根据信令控制节点的协调实现动态开启和关闭，为用户提供更好的数据传输服务。在减少用户间、接入点间的干扰之外，还能减少网络的能耗，实现绿色环保的网络目的。

■ 至简协议栈和资源管理

6G 时代业务的多样性对 QoS 提出了更多的需求，全息通信、沉浸式 XR、数字孪生等不同业务对 6G 网络的业务质量保障有着更为细致的要求。如何能将空口能力与不同的业务

需求相匹配成了需要解决的问题。在目前 5G 网络中，QoS 需求接近的业务在空口会映射到同一无线承载通过优先级调度来实现不同 QoS 需求，但面对更多样的 6G 业务，可能无法满足需求。而且随着网络的不断延展，网络的复杂度不断增加，一些协议栈的不同协议层比如：MAC(Medium Access Control)、RLC(Radio Link Control)、PDCP(Packet Data Convergence Protocol)间的功能（包括：重传、重排序等）会有冗余，需要更精简或轻量的协议栈。

用户为中心的网络需要适配用户的不同业务需求，减少层间的冗余处理，比如：现有 PDCP 和 RLC 层都需要处理的 SN(Sequence Number)号维护、重传等功能，可以根据不同的业务需求，统一实现不同功能，减少现有层间相同功能的冗余，以提高数据处理的效率。按照这样的设计思路，考虑基于体现不同业务需求和空口不同链路能力的匹配，将协议栈分为上层链路和下层链路，上层链路可以映射到多个下层链路，基于上层链路获取的业务不同需求和 QoS 特征信息，考虑下层的链路状态，比如：资源拥塞状态、信道质量等信息，选择合适的下层链路，分配满足业务需求的时域、频域、空域等资源，以及配置不同协议栈功能，实现根据业务需求动态资源调度和 QoS 满足的目的。

■ 以用户为中心的用户自主选择

以用户为中心的多类型网络接入方式，可以给予用户更大的自主选择权利。用户根据业务需求和周围网络环境选择接入的网络以及做出移动性决策；用户上报不同需求的辅助信息，网络来提供满足用户不同需求的个性化配置。

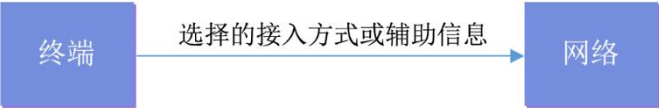


图 4-35 UE 自主选择或辅助上报

4.12 物理层安全技术

传统基于密码学的安全策略在过往很长的一段时间内，都恪尽职守且很好的保护着通信安全。然而，随着计算机算力的提升，现如今即便采用非常复杂的加密算法，都有被攻破的风险；同时，6G 网络更加复杂的结构以及全应用场景的覆盖，让密钥的分发、存储、废止过程变得越发困难^{[55][56][57]}。

为了充分提升 6G 通信安全，从物理层着手，充分利用无线信道的随机特性，结合现有的通信方法抑制信息泄露、对抗主动攻击，从而实现物理层安全，成为了一个重要的安全技术路线；进一步地，将物理层安全技术与现有的基于密码学的安全策略相结合，能极大程度

地提升 6G 通信的安全性，实现 6G 通信安全的多层保障。

■ 物理层安全传输技术

物理层安全思想与无线传输技术相结合，催生了物理层安全传输技术。这一技术旨在通过信道编码和信号处理技术来保护通信安全。

在被动窃听的安全场景下，物理层安全传输技术主要通过降低向窃听端泄露信号的功率或者发送对目标接收端影响甚小的干扰信号，来阻塞窃听端对通信信号的接收，并确保目标接收端的可靠接收，实现安全通信。显然，如何降低窃听端的信干噪比或者说窃听信道容量成为了实现物理层安全传输的关键^{[55][56][57]}。

一方面，可以通过波束赋形抑制在非目标接收端方向的信号泄露，隐性地提升物理层传输安全，也可以通过合理构造发射信号，在主信道方向上发射保密通信信息，并在其正交空间内投射各向同性且同频的“人工噪声”，以达到恶化窃听信道，抑制保密信息泄露的目的。另一方面，可以利用协同中继技术或其他通信节点辅助手段，借助中继节点或辅助节点向非目标接收端方向发射随机干扰信号，以阻塞潜在窃听端，保障通信安全。

在主动窃听的安全场景下，窃听端通常采取导频污染攻击，诱导发射端错误估计信道，来增加主信道与窃听信道的相关性，以向窃听端泄露更多保密信息。为对抗这一窃听策略，攻击检测成为了重要的物理层安全传输技术^[58]。

一方面，可以通过在导频训练阶段额外引入随机信息，并假定窃听端对这些信息未知，通过多次导频训练可以甄别主动窃听用户；另一方面，也可以通过信号的统计特征进行检测。典型地，可以通过接收信号能量的统计特征进行检测，当接收信号的能量高出合理范围，则可以认定网络中存在主动干扰。

■ 物理层密钥生成技术

物理层安全思想与密码学安全策略相结合，推动了基于物理层安全的密钥生成机制^{[55][59][60]}。

如果说物理层安全传输技术是从物理层寻求异于现有安全机制之外的安全方法，那么，基于物理层安全的密钥生成机制则是采用了折中的思路。它实质上是一种由传统高层基于密钥的安全机制向物理层延伸的设计，其原理是基于通信双方具有唯一性的物理信道来生成安全密钥。在双方获得信道后，抽取信道的随机信息，然后进行密钥量化、密钥协商、隐私放大等步骤生成基于物理层的密钥。由于该密钥基于收发用户间的物理层无线信道，所以具有难被窃听者破解的特点，并且通信双方共享密钥的方式也较简单，可以应用在通信网络各层的加密中。

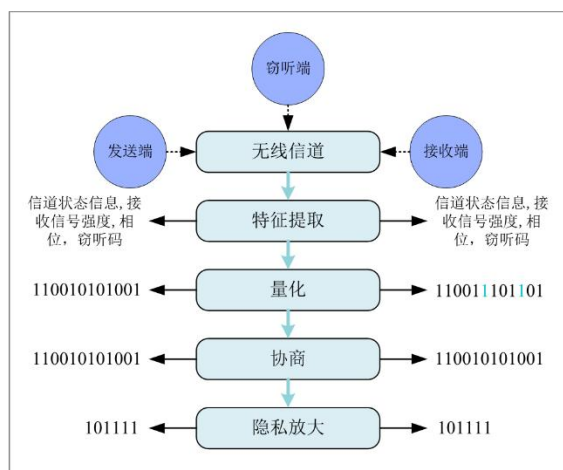


图 4-36 经典物理层密钥生成流程

■ 物理层鉴权技术

物理层安全思想与传统鉴权认证机制相结合，确立了物理层鉴权认证的方法。物理层鉴权旨在通过利用物理层信号的细微特性来识别硬件设备或终端的身份，以达到鉴权的目的^[57]
[60]。

具体地，一方面，可以利用射频指纹技术，通过提取接收信号中的环境敏感特征和环境不变特征，利用分类器进行分类匹配，实现身份鉴权。另一方面，也可以基于导频信号，实现物理层的鉴权，比如：在导频信号中加入用于身份识别的信息，收发双方交替发送具有相关性的信息等。此外，还可以利用窃听编码进行物理层鉴权，其核心思想在于收发双方私密确定一个认证许可编码，该编码在完整窃听信道编码集合中随机选出，当接收端收到的信息解码后属于认证许可编码集合，则认为鉴权成功。反之，则认为鉴权失败。显然地，物理层鉴权技术将有效的从物理层实现身份鉴权功能，区分合法用户与窃听用户，确保通信双方身份的合法性。

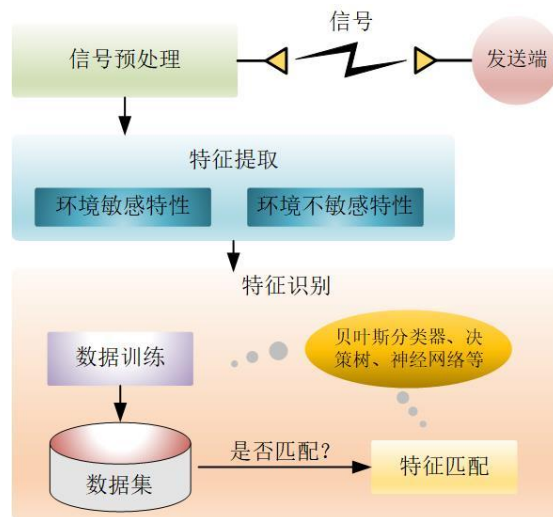


图 4-37 基于射频指纹的物理层鉴权方法

物理层安全技术为保障无线通信安全提供了新的思路，是深入到系统更底层的安全探索。它可以与现有密码加密体系兼容共存，实现双重安全防护。不可否认，它对信道状态的极高要求，限制了这一技术的产业实现。不过，在 6G 中，更高精度的信道状态信息将促成这一关键安全技术的落地。

5 6G 发展的几点思考

1) 6G 的杀手级应用场景和业务是什么？

在 ITU 给出的六大应用场景中，有三个场景（沉浸式通信、极可靠低时延通信、大规模通信）是在 5G 三大场景基础上进行性能指标扩展，有三个场景（AI 通信一体化、感知通信一体化、泛在连接）是在 5G-Advanced 阶段有所涉猎的场景。相较于 5G 在这六大场景的商业应用，能体现 6G 核心竞争力的杀手级应用场景和业务是什么，元宇宙？泛在智能？性能极致的工业互联网？天地无缝宽带？海量物联？通信感知深度融合业务？虽然目前尚不能给出明确答案，但这是未来 6G 能否商用成功的关键所在，需要 IT/通信/大数据等相关技术发展、商业模式创新和产业应用推广等生态系统各个环节去不断推动合作探索。希望产业同仁能够共同思考，能在大概 2030 年 6G 商用时候给出答案。

2) 6G 的主打通信频段在哪里？

频谱是无线通信的重要资源，可以说频谱选择的好坏在一定程度上决定一代通信技术能否成功商用。在 5G 时代，我国优先选择中频段（2.6GHz/3.5GHz）建设 5G 网络取得先发优势，带来了 5G 商业上的成功，而毫米波频段在商用普及度方面表现差强人意。6G 的潜在候选频段分布广泛，包括 IMT 已商用频段如 6GHz 以下频段和毫米波频段、新增厘米波频段如 6GHz, 7GHz-10GHz 等和太赫兹频段。哪个频段将成为 6G 主打频段？是现有 6GHz 以下频段在 6G 时代继续独占鳌头，还是厘米波频段会异军突起发挥中频段的覆盖优势，还是毫米波频段厚积薄发在 6G 时代大展手脚，还是太赫兹等超高频段能够在特色应用上彰显 6G 亮点？基于过往蜂窝网络发展历程以及 6G 业务的带宽需求，我们判断厘米波频段将成为 6G 打底网的主力频段，在大容量广覆盖场景中发挥重要作用；现有 6GHz 以下频段将继续成为中容量广覆盖的重要频段；毫米波经历 5G 商用试水后逐步成熟，是提升网络热点区域容量（如商场、办公楼宇等）的重要频段，为 6G 超高速传输提供保证；太赫兹在技术先进性方面具有吸引力，但由于其产业成熟度不足以及应用场景受限，可能只在特殊短距场景下发挥作用。

3) 第一个 6G 标准何时完成制定，6G 以什么时间节奏进行演进？

6G 标准的时间点关乎整个通信产业发展的节奏，包括运营商网络部署和更新换代时间点、网络终端设备厂商和芯片厂商的技术储备和产品研发规划。根据 ITU 的规划，6G 标准将于 2030 年对外发布，候选技术方案的提交窗口为 2027 年至 2029 年，6G 第一版标准何时完成是产业关注的焦点。5G 第一版 R15 标准支持非独立组网（Non-Standalone, NSA）和独立组网（Standalone, SA），先后产生了 NSA early drop、SA、NSA late drop 三个小版本标准。多个小版本标准的快速迭代对 5G 商用带来了一定的困扰，5G 布网难度和终端复杂度

都明显提升。6G 应吸取 5G 第一版标准的经验教训，用足够的时间精心打磨出有利于 6G 产业化的第一版 6G 标准，给标准研究阶段（Study Item, SI）留出足够时间，避免像 5G 一样出现多个小版本标准。因此，我们建议6G标准SI阶段从2025年中旬持续到2027年中旬，用两年的时间对6G进行深入研究，到2028年底或2029年初完成6G第一版标准化工作。另一方面，5G 标准从 R16 开始大概以每两年的速度推出一版新标准。6G 的演进是否也需要 5G 这么快的节奏，产业对于标准演进的迫切度如何，是否用较长时间把一个版本标准做精做细是更好的选择？这需要标准领域专家不断讨论逐步达成共识。

4) 6G 技术路线如何选择，以演进路线为主还是革命路线为主？

如前面所述，6G 六大应用场景在 5G 阶段均有所涉猎，支撑这六大场景的标准技术也在 5G 和 5G-Advanced 阶段都开展了相应研究。未来 6G 的技术是走一条和 5G 不同的革命性技术路线还是在 5G 基础上做进一步优化以实现 6G 的技术需求指标？这一方面取决于 6G 时代有没有高成熟度的突破性技术，另一方面也取决于整个通信产业上下游的商业发展路标。从目前的技术发展来看，我们认为基于 5G 的演进技术和革命性技术在 6G 时代会共同构成 6G 技术集。6G 通信底层技术，如波形、调制编码、MIMO、调度反馈等，中低频段和毫米波频段大概率会在 5G 技术基础上进行增强；太赫兹频段可能会引入革命性的底层技术。在海量物联方面，非正交技术在 5G 研究基础之上有可能成为 6G 重要的候选技术。6G 通信高层架构有可能突破 5G 架构设计理念，引入端到端服务化架构。在交叉技术领域，如 AI 通信一体化、通信感知一体化等，革命性技术的引入空间较大，如基于 AI 理念的多模块/端到端设计、适用于通信感知的联合波形设计等。

5) 6G 标准是统一框架设计还是各个典型场景独立设计？

以统一灵活设计为出发点，3GPP 给出了一套可以通过灵活参数配置来适应不同应用场景的 5G 标准。6G 标准在设计思路上是沿用 5G 思路来设计，还是面向各类典型场景进行独立设计？这也是决定未来 6G 技术走向的关键决策。采用统一灵活设计可以加快标准制定进程，降低标准制定开销，也有利于不同类产品在技术研发上能够有所借鉴，可以加速产品研发进程，其缺点就是统一设计往往会导致各个场景的性能不能做到极致，需要后续不断演进打补丁，并且统一设计给产业落地传递的技术路线往往不太清晰，需要产业花费一定时间对系统方案去做进一步的筛选，在一定程度拖慢了产业落地的节奏，造成某些领域技术碎片化的风险；采用独立设计可以针对给定场景做专门的优化，在性能上做到极致，同时能够给产业明确的产品技术路标，避免产业技术落地发生分化，其缺点是标准制定难度高、周期长和开销大。除了蜂窝通信技术，业界还有许多其他优秀通信技术不断出现和发展。尤其是在短距通信领域，出现了 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、LoRa、RFID 等技术，在特定的应用场景下可以发挥其极低功耗、极低成本、极简部署等优势。未来 6G 可以沿着两条路线发展，一种思路是在 6G 蜂窝网络设计中不断吸纳其他技术体系的优点，形成统一空口来满足多样化的场

景需求，另一种思路是未来的 6G 网络是多个技术体系的综合体，多个空口技术保持各自的独立性，在高层或核心网层面实现各个空口技术的互联互通。这两种思路均应囊括在 6G 标准设计中，从而让 6G 能够有更大的应用场景和包容度。

6) 6G 对相关产业的影响

与 5G 相比，人们更加期待 6G 时代的通信技术与其他技术领域如 IT、卫星、大数据、感知等进行深度融合。。这些融合会对相关产业带来哪些影响，各个行业是否会相互合作共创辉煌，还是会根据自身利益走各自的发展路线？在 5G 阶段，IT 和通信的融合主要体现在核心网架构和产品实现方案上，接入网还是采用传统的通信设计理念，未来 6G 能否让 IT 和通信融合进一步扩展到接入网是值得关注的，因为这决定了未来 6G 的参与厂商是否会涉及更多的 IT 公司；卫星通信方面，全球范围内还存在着多种公开或私有的卫星通信体制，因卫星广覆盖的特点和各国的卫星发展的历史原因，很多卫星系统自网络侧到终端侧都是高度封闭的，无法进行互联互通。在卫星轨道资源越来越紧缺的情况下，未来能否将更多的卫星制式统一到 6G 的框架中来，以便 6G 能够获得更多的卫星基础设施，是 6G 实现天地一体化大构想的关键。随着 AI 通信一体化和感知通信一体化成为 6G 的两大应用场景，大数据领域和感知领域与通信的深度融合在 6G 时代已成必然，未来通信产业、大数据产业、算力产业以及感知产业如何各取所长、形成合力是 6G 商业化成功的关键。

7) 6G 商业宣传模式探索

过往 5G 商用宣传往往采用具有标志性和吸引眼球的理论性能指标如“下行峰值速率可达 20 Gbps”，这使人们从 5G 商用之初对 5G 性能和基于它的创新业务抱有过高期待，然而实际 5G 网络速率取决于频谱带宽、信道环境、终端能力等多种因素，用户能体验的 5G 峰值速率往往在几百 Mbps，商业宣传和实际体验的差距导致 5G 商用没有像 4G 一样迅速普及，在某种程度上，误导性的宣传对于 5G 的实际商用带来了一定程度的反噬。6G 未来的商业宣传模式需要吸取 5G 经验教训，避免宣传 ITU 制定的理论性能指标，而是根据实际部署的 6G 网络的测试情况，宣传用户能切实体验到的、比 5G 有明显提升的 6G 性能指标。另一方面，6G 也要通过研究应用场景和杀手级业务，增加其宣传维度，让用户从更多角度去感受 6G 带来的别样体验。

6 参考文献

- [1]. Report ITU-R M.2516, Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems towards 2030 and beyond, 2022.11.
- [2]. 6G 典型场景和关键能力白皮书, IMT-2030 (6G) 推进组, 2022.
- [3]. Report ITU-R, 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.
- [4]. Recommendation ITU-R M.2083, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
- [5]. Report ITU-R M.2410, Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s).
- [6]. Moore M. International Roadmap For Devices and Systems[J]. Accessed: Jan, 2020.
- [7]. 郭昕婕, 王光耀, 王绍迪. 存内计算芯片研究进展及应用[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(5): 1888-1898. doi: 10.11999/JEIT220420.
- [8]. 李妍, 范筱, 黄晓明, 等. 面向未来的陆海空天融合通信网络架构[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 104-115.
- [9]. TWG-report-6G-technologies, Next G alliance, 2022.
- [10]. 宗佳颖, 刘洋, 刘海涛, 等. 面向 6G 的微服务化无线网架构研究[J]. 电子技术应用, 2021.
- [11]. 6G 服务化 RAN 白皮书, 中国移动通信有限公司研究院, 2022.
- [12]. 贾庆民, 胡玉姣, 张华宇, 等. 确定性算力网络研究[J]. 通信学报, 2022, 43(10): 55-64.
- [13]. Kunze I, Wehrle K, Trossen D, et al. Use cases for in-network computing [J]. Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-irtf-coinrg-use-cases-00, 2021.
- [14]. 郭凤仙, 孙耀华, 彭木根. 6G 算力网络: 体系架构与关键技术[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 10.
- [15]. 算力网络 算力度量与算力建模技术要求, CCSA, 2023.
- [16]. 通信感知一体化技术研究报告 (第二版), IMT-2030 (6G) 推进组, 2022.
- [17]. 5G-A 通感融合网络架构研究报告, IMT-2020 (5G) 推进组, 2023.
- [18]. Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450-2525.

- [19]. Wen Tong and Peiying Zhu, 6G: The next horizon from connected people and things to connected intelligence. Cambridge University Press, 2021.
- [20]. 超大规模天线技术研究报告, IMT-2030 (6G) 推进组, 2021.
- [21]. Jeon J, Lee G, Ibrahim A A I, et al. MIMO evolution toward 6G: Modular massive MIMO in low-frequency bands [J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(11): 52-58.
- [22]. 智能超表面技术研究报告, IMT-2030 (6G) 推进组, 2021.
- [23]. Everett E, Sahai A, Sabharwal A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 680-694.
- [24]. Zhou J, Reiskarimian N, Diakonikolas J, et al. Integrated full duplex radios [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4): 142-151.
- [25]. Kolodziej K E, Perry B T, Herd J S. In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 3025-3041.
- [26]. Bharadia D, McMilin E, Katti S. Full duplex radios [C], in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM. 2013: 375-386.
- [27]. Hadani R, Rakib S, Tsatsanis M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]. In 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1-6.
- [28]. E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 7, pp. 168-175, 2016.
- [29]. 可见光和太赫兹通信技术研究报告, CCSA, 2019.
- [30]. Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3211-3221.
- [31]. Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9-10): 533-572.
- [32]. 王磊, 李飙. 太赫兹波及其产生方法的研究[J]. 中国科技信息, 2011(7): 41-43.
- [33]. 杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬, 等. 太赫兹波及其常用源[J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 125-131.
- [34]. 孟凡亮, 余厉阳. 基于真空电子学方法的太赫兹源[J]. 物联网技术, 2015, 5(2): 50-51.
- [35]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), New study item proposal: Study on downlink multiuser superposition transmission for LTE, RP-150496. 2014.
- [36]. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), New work item proposal: Downlink multiuser superposition

- transmission for LTE, RP-160680, 2016.
- [37]. Dai L, Wang B, Yuan Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
 - [38]. Ping L, Liu L, Wu K, et al. Interleave division multiple-access [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2006, 5(4): 938-947.
 - [39]. Xiong Q, Qian C, Yu B, et al. Advanced NoMA scheme for 5G cellular network: Interleave-grid multiple access [C]//2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2017: 1-5.
 - [40]. Wu S, Zhang S, Li Q, et al. Study of Non-Orthogonal Multiple Access Technology for Satellite Communications[C]//2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2022: 771-775.
 - [41]. Ian F. Akyildiz; Chong Han; Shuai Nie. Combating the Distance Problem in the Millimeter Wave and Terahertz Frequency Bands [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(6): 102 – 108.
 - [42]. Qi Bi. P-RAN: A Distributed Solution for Cellular Systems in High Frequency Bands[J]. IEEE Network, 2022, 36(4):86 – 91.
 - [43]. Sanislav T, Mois G D, Zeadally S, et al. Energy harvesting techniques for internet of things (IoT) [J]. IEEE Access, 2021, 9: 39530-39549.
 - [44]. Van Huynh N, Hoang D T, Lu X, et al. Ambient backscatter communications: A contemporary survey [J]. IEEE Communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 2889-2922.
 - [45]. 3GPP TR 22.837, Feasibility Study on Integrated Sensing and Communication.
 - [46]. 5G-A 通感空口技术研究报告, IMT-2020 (5G) 推进组, 2023.
 - [47]. Ye H, Li G Y, Juang B H. Deep learning based end-to-end wireless communication systems without pilots [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 702-714.
 - [48]. Wen C K, Shih W T, Jin S. Deep learning for massive MIMO CSI feedback [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 748-751.
 - [49]. Soltani M, Pourahmadi V, Mirzaei A, et al. Deep learning-based channel estimation [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 652-655.
 - [50]. McMahan B, Moore E, Ramage D, et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data[C]//Artificial intelligence and statistics. PMLR, 2017: 1273-1282.
 - [51]. Radford A, Narasimhan K, Salimans T, et al. Improving language understanding by generative pre-training [J]. In preprint, 2018.

- [52]. 陈山枝.关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J].电信科学, 2020, 36(6):13.
- [53]. 面向 5G 增强及 6G 的星地融合技术研究研究报告, CCSA, 2020.
- [54]. Chen S, Qin F, Hu B, et al. User-centric Ultra-dense Networks for 5G[M]. Springer, Cham, 2018: 1-3.
- [55]. Mukherjee A, Fakoorian S A A, Huang J, et al. Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1550-1573.
- [56]. Sun L, Du Q. Physical layer security with its applications in 5G networks: A review [J]. China communications, 2017, 14(12): 1-14.
- [57]. Liu Y, Chen H H, Wang L. Physical layer security for next generation wireless networks: Theories, technologies, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(1): 347-376.
- [58]. Kapetanovic D, Zheng G, Rusek F. Physical layer security for massive MIMO: An overview on passive eavesdropping and active attacks [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 21-27.
- [59]. Zeng K. Physical layer key generation in wireless networks: challenges and opportunities [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 33-39.
- [60]. Wang X, Hao P, Hanzo L. Physical-layer authentication for wireless security enhancement: Current challenges and future developments [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(6): 152-158.



扫码获取电子版

本文件所含数据和信息都属于紫光展锐机密及紫光展锐财产，紫光展锐保留所有相关权利。当您接受这份文件时，即表示您同意此份文件内含机密信息，且同意在未获得紫光展锐同意前，不使用或复制、整个或部分文件。紫光展锐有权在未经事先通知的情况下，对本文件做任何修改。紫光展锐对本文件所含数据和信息不做任何保证，在任何情况下，紫光展锐均不负责任何与文件相关的直接或间接的、任何伤害或损失。