

vivo

vivo 6G白皮书

6G服务、能力与使能技术

6G

vivo通信研究院
2022年7月

目录

1	引言.....	3
2	6G 服务.....	3
2.1	从 5G 服务到 6G 服务	3
2.2	6G 服务用例	6
3	6G 能力.....	8
3.1	6G 性能指标	8
3.2	6G 效率指标	12
3.3	6G 应用场景	14
4	6G 使能技术.....	15
4.1	系统功能框架	16
4.2	移动算网融合	17
4.3	通信感知一体化	19
4.4	智能内生系统	24
4.5	数据功能与数据面	29
4.6	极低功耗通信	31
4.7	MIMO 演进技术.....	36
4.8	可重构智能表面	38
4.9	延迟多普勒域波形	41
4.10	其他技术.....	45
5	结束语.....	46
	参考文献.....	47
	缩略语	52

版权信息：

本白皮书版权专属维沃移动通信有限公司（以下简称“vivo”）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，vivo 将追究其法律和道德之责任。

1 引言

2020 年 10 月，vivo 通信研究院发布了《数字生活 2030+》和《6G 愿景、需求与挑战》两本白皮书[1,2]，提出了构建自由连接的物理与数字融合世界的 6G 愿景。《数字生活 2030+》通过大量的具体用例，描绘了面向 2030 年及以后 6G 时代数字化生活的美好场景。《6G 愿景、需求与挑战》初步分析了为实现这些场景，6G 系统的技术愿景、需求，以及面临的挑战。

近两年来，行业逐步对 6G 提供的服务和需要达成的关键能力指标形成共识，相关的关键使能技术研发也正在不断深入。vivo 通信研究院携手合作伙伴，对 6G 商业模式和驱动力进行分析研判，对 6G 应用场景进行研究分析，并深入开展了 6G 系统架构与使能技术的研究、评估与技术实验。本白皮书进一步提出 6G 服务、能力与使能技术的最新成果和初步观点，为行业 6G 发展添砖加瓦。

2 6G 服务

2.1 从 5G 服务到 6G 服务

从 1G 到 4G，移动通信系统都围绕着信息的传输，以通信容量更大、速率更快、时延更小为最主要目标，约十年一代的节奏不断演进。

5G 支持 eMBB (Enhanced Mobile Broadband, 增强移动宽带), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, 超高可靠和超低时延通信) 和 mMTC (Massive Machine Type Communication, 大规模机器类通信) 三大应用场景，将移动通信从面向以人为主要信息消费市场，拓展到物联网和行业应用。5G 网络通过 IMS (IP Multimedia Subsystem, IP 多媒体子系统) 提供基础电信业务，如短信、语音与视频通话等，并进一步增强支持 5G 新通话和 5G 消息；通过控制面和用户面功能提供不同 QoS (Quality of Service, 服务质量) 的按需移动数据连接；通过 NEF (Network Exposure Function, 网络开放功能) 或者通用 API (Application Program Interface, 应用程序界面) 框架的方式为第三方应用提供无线定位和网络信息等服务；通过 MEC (Multi-Access Edge Computing, 多接入边缘计算) 提供边缘计算服务。总之，5G 支持面向个人及行业的高性能通信服务和 UE 定位、网络信息开放等信息服务，并通过部署 MEC 支持计算服务。

面向 2030+, 人们将追求更加美好的数字化生活, 产业数字化升级将极大的提升生产效率, 数字化社会治理将给我们带来更加和谐美丽的社会环境。那么 6G 系统将提供哪些服务呢?

纵观《数字生活 2030+》白皮书中 29 个生活场景案例的技术需求, 可以总结为三方面: 无所不在的按需连接、泛在精深的数字化、以及普遍存在的智能化。

《6G 愿景、需求与挑战》白皮书提出了构建“自由连接的物理数字融合世界”的 6G 愿景: “面向 2030 年及以后, 6G 将构建泛在数字世界, 并自由连接物理世界和数字世界, 实现二者相互作用和高度融合, 从而提供丰富的业务应用, 促进社会高效可持续发展, 提升人类幸福度”。

为实现自由连接的物理数字融合世界, 需要泛在感知及信息扑捉能力实现对物理世界的精准实时数字化采集, 并通过泛在连接加融合计算(包括算力、存储、智能)能力构建数字世界, 同时通过强大的通信能力实现物理与数字世界的自由连接以支持千行百业的数字化应用。所以, 通信、信息和计算是构建自由连接的物理与数字世界的三项最重要的基础能力。6G 将原生地支持通信、信息和计算服务, 成为支撑未来社会高效可持续发展的网络信息底座。

如图 1 所示, 超强通信、基础信息、融合计算将成为 6G 的三大服务。包括 6G 在内的通信、信息、计算系统和技术, 以及新型材料、新型终端、智能人机交互、集成电路等诸多技术, 将共同构建自由连接的物理数字融合世界, 支撑 2030+ 的数字生活、数字治理和数字生产。



图 1：6G 构建自由连接的物理数字融合世界

超强通信服务

蜂窝移动通信从诞生开始旨在无线移动场景下提供无缝的通信及连接服务，6G 将延续这一历史使命，提供超强通信服务。一方面，6G 的基础电信业务将在支持 5G 富媒体语音、视频、短消息业务基础上，进一步支持沉浸式 XR (Extended Reality, 扩展现实)、全息远程呈现、多感官互联等新业务[3~6]。另一方面，6G 移动数据连接服务将在容量、数据速率、时延、可靠性等诸多方面持续提升，拓宽客户范围并提高服务价值，并具备更多的端到端的灵活性和适应性以满足个人和行业更多应用场景的需求。同时，6G 将进一步扩大地理空间的覆盖范围，降低终端的接入门槛，提高连接的可获得性，扩大客户数目，实现物理世界与数字世界的自由连接与信息传输。

基础信息服务

6G 系统的终端或者基站设备在发射无线电波进行通信的同时，还可以对接收信号进行测量，从而对电波传播环境及其中的目标物体进行无线感知，得到位置、速度、方向、材质、成像等信息，从而支持丰富的感知应用和场景。此外，6G 作为一个泛在联接的系统，在支撑物理与数字世界连接的过程中，会产生大量有价值的基础数据信息。相比 5G 仅提供 UE 定位和网络信息开放等有限的信息服务，6G 将提供无线感知与定位，增强网络信息开放。此外，6G 还可以收集

各类传感器信息和 GIS（Geographic Information System，地理信息系统）信息等行业公共信息，赋能千行百业，以避免各行业应用对该类信息的重复收集。综上，6G 基础信息服务包括无线感知、增强的网络信息开放、以及行业公共信息等。

融合计算服务

算力是数字化经济时代的新生产力，算力包括网络、计算和存储等多维度资源。在基于 5G 移动连接的数字化系统中，应用业务所需的计算通常在终端和云端执行，5G 系统提供终端侧和云端服务器的连接通道辅助完成计算任务。在 6G 时代，面向沉浸式 XR、交互型 3D 虚拟数字人、协作机器人、无人驾驶、多感官互联等服务用例[3~6]，将面临终端侧的算力、存储、智能等能力不足，云端因距离远而时延不满足需求的挑战。虽然 5G 部署 MEC 可满足部分场景需求，但算网融合度不高。6G 将内生支持融合计算功能[7]，通过算网融合技术提供包括 AI（Artificial Intelligence，人工智能）在内的融合计算服务，更好的使能物理与数字世界高度融合。

2.2 6G 服务用例

如前所述，6G 将提供超强通信、基础信息和融合计算三大服务。基于一种或者多种服务，考虑若干要素例如服务用户、服务地点、服务需求等，则会产生各种各样的服务用例。面向 2030+，更多的服务用例都会涉及到两种或者三种服务，例如通信+信息服务、通信+计算服务、以及通信+信息+计算服务。无人驾驶就是一种同时需要通信、信息以及计算服务的复杂服务用例。图 2 给出了 6G 服务与服务用例的示意图。



图 2： 6G 服务与服务用例

作为未来社会网络信息底座，从商业上讲，6G 服务的主体为 6G 运营商，客户包括移动连接的终端用户以及千行百业的 OTT（Over The Top）服务提供商，服务内容包括超强通信、基础信息与融合计算三大服务，以及由三大服务衍生出来的丰富多彩的服务用例。运营商通过包括网络基础设施和 6G 终端在内的 6G 系统为客户提供各类服务并创造价值，是 6G 服务体系设计的基本商业逻辑。



图 3： 6G 服务体系

3 6G 能力

6G 原生支持通信、信息、计算服务以及相关的服务用例，为了指导 6G 技术选型和系统设计以实现这些服务和用例，需定义 6G 能力。6G 能力包括性能指标和效率指标。其中，6G 性能指标是指 6G 提供服务的可达性能，直接影响用户的服务体验。6G 效率指标体现了 6G 系统提供服务的代价和效率，定义合理的 6G 效率指标是保证 6G 网络可持续发展的前提。如图 4，6G 性能指标包括通信性能、信息性能和计算性能；6G 效率指标包括频谱效率、能效和成本效率等。

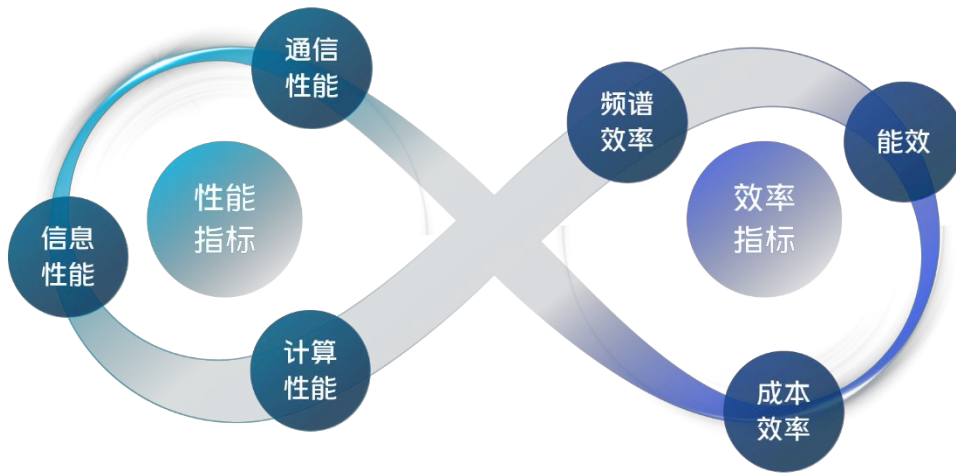


图 4：6G 性能指标与效率指标

3.1 6G 性能指标

3.1.1 超强通信的性能指标

6G 可以基本沿用 5G 通信性能指标的定义[8,9]，6G 通信性能指标的取值相比 5G 将进一步提升。为了支持全息远程呈现、智能交互、沉浸式 XR、实时远程控制、万物智联等先进服务用例，6G 的数据速率（包括峰值速率和用户体验速率）、通信时延和流量密度等各项性能指标均比 5G 有数倍甚至量级的提升[2,4,10]。表 1 给出了 6G 通信性能指标的定义和建议值。

表 1: 5G 和 6G 的通信性能指标的对比

通信性能指标	定义	5G 需求	6G 需求
峰值速率	每个用户/设备在理想条件下可实现的最大数据速率	20 Gbps	>100 Gbps
用户体验速率	目标覆盖区域内移动用户/设备可实现的数据速率	0.1-1 Gbps	>1 Gbps
通信时延	从源头发送数据包到目的地接收数据包的时间跨度	1 ms	0.1 ms
流量密度	单位地理区域提供的总的业务吞吐量	10 Mbit/s/m ²	1000 Mbit/s/m ²
连接密度	单位面积的连接和/或可访问设备的总数	1/m ²	10-100/m ²
移动速率	满足一定 QoS 时，收发双方间的最大相对移动速度	500 km/h	1000 km/h
可靠性	在规定的最大时间内传输固定大小的数据包的成功概率	0.99999	0.9999999
时间精度	设备间的时间同步精度	微秒(us)量级	纳秒(ns)量级

除上述可量化的性能指标之外，覆盖范围也是非常重要的系统性能指标。一方面，6G 将通过卫星通信、高空平台通信等技术，支持空天地海全覆盖。另一方面，6G 将进一步扩展终端可接入范围，融合反向散射通信等技术，支持极低功耗终端通信，提升体域网等近场覆盖场景的性能。

3.1.2 基础信息的性能指标

6G 基础信息服务包括无线感知、增强的网络信息开放、以及行业公共信息等，其性能指标有所不同。

感知的性能指标

6G 除了像 5G 支持对 UE 的定位外，还支持对目标及环境的感知。不失一般性，参考雷达感知领域的常用定义，6G 系统感知服务的关键性能指标定义如表 2 所示。

表 2：感知性能指标的定义

感知性能指标	定义
感知精度	感知精度指在某一置信度下真实结果和感知结果之间的偏差程度，可通过感知误差（如均方根误差）来表征，感知误差越小，感知精度越高。感知精度包括距离精度、速度精度、角度精度、以及其他感知精度等。
感知分辨率	感知分辨率指从不同维度区分多个感知目标的能力，包括距离分辨率、速度分辨率、角度分辨率等。
感知范围	感知范围指满足一定感知性能指标（如感知精度）的前提下特定感知参数的有效范围，具体包括感知距离范围、感知速度范围、感知角度范围等。
感知时延	感知时延用于定量描述感知业务的实时性要求，例如从产生感知服务请求到反馈感知结果的最大时延。
感知更新频率	感知更新频率为相邻两次感知结果的时间间隔的倒数。

6G 感知性能指标的取值范围取决于 6G 通感一体化系统部署的频段、系统带宽、发射机与接收机的结构、天线数目、收发同步精度等。表 3 给出了两种系统配置下的感知性能指标。测算方法根据雷达信噪比的计算方法和感知精度计算方法[11]。

表 3：两种系统配置下的感知性能指标

系统参数		系统配置一	系统配置二
	中心频点	6GHz	30GHz
	带宽	400MHz	2GHz
	天线阵子数/阵子增	256/8dBi	512/8dBi

	益		
	基站发射功率	55dBm	40dBm
	站间距	500m	200m
	参 考 RCS （ Radar Cross Section，雷达散射截面）	0.1m ²	0.1 m ²
	目标最大速度	120km/h	120 km/h
	相干处理时长	5ms	1ms
小区边缘感知性能	距离分辨率	0.375m	0.075m
	速度分辨率	5m/s	5m/s
	角度分辨率（方位角/俯仰角）	7.2° /7.2°	3.6° /7.2°
	距离精度	约 0.1m	约 0.1m
	速度精度	约 1m/s	约 7m/s
	角度精度（方位角/俯仰角）	约 2° /2°	约 5° /10°

基础信息的其他性能指标

除无线感知以外，6G 还将提供增强的网络信息开放、以及行业公共信息等，其潜在的性能指标包括可用性、响应性等。

3.1.3 融合计算的性能指标

6G 支持算力卸载、在网计算、AI 服务等融合计算服务。AI 服务的性能指标 [12~15]包括可达性能（包括 AI 性能如归一化均方误差、余弦相似度等，通信性能如数据速率、覆盖、误块率等）、AI 模型复杂度、收敛速度（或训练时间）、泛化能力、数据依赖性、推理时间、训练的算力开销、模型的传输开销和模型的存储开销等。AI 服务的性能指标取决于 AI 算法和大数据技术等计算机领域相关技术在 2030 年及以后的发展水平。

6G 融合计算的性能指标可以由 6G 系统部署的计算及通信相关资源和性能

综合决定。需要考虑 6G 计算的典型业务用例，以及相关的用户密度、业务模型等因素，来定义 6G 系统的计算性能指标和用户的计算性能指标。

交互型 3D 虚拟数字人有望成为 2030+元宇宙时代的普遍业务用例之一[16]。初步测算，50 万面以上的高精度高智慧交互型虚拟数字人，人物表达所需的驱动和渲染的计算需求预计不小于 10 Tera FLOPS（FLoating-point Operations Per Second，每秒浮点运算次数），该计算需求超过大多数智能终端的能力。实时交互体验要求数字人对人的语言动作的反馈的总时延不超过 200 ms，去掉传输时延等其它开销，预计 6G 系统中的计算时延要求在 10 ms 到 100 ms。集中的云端渲染几乎无法满足需求，需要 6G 系统提供低时延计算服务。假设活跃用户密度为每 5 m² 一个人，每人每天使用数字人的平均时间为 30 分钟，忙时集中率为 10%，小区覆盖面积为 10000 m² 为例，支持该应用场景所需的性能指标如表 4。因不同计算用例需求的差异性，运营商的 6G 计算能力需根据业务需求合理部署规划。

表 4：计算服务的性能指标

融合计算的 性能指标		定义	基于虚拟数字人用例 的需求值
系统性 能指标	算力密度	移动通信网络单位覆盖面积能提供的算力	~100000 Tera FLOPS/ km ²
	计算连接 密度	移动通信网络单位覆盖面积能提供的计算服务连接数量	~10000/ km ²
用户性 能指标	峰值算力	单用户可获得的峰值计算性能	~10 Tera FLOPS
	计算时延	从用户发起计算服务请求到接收到计算响应的整体时延	10 ms – 100 ms

3.2 6G 效率指标

通信服务的效率指标通常包括谱效、能效和成本效率，这三项指标基本上可以复用到信息服务中的无线感知服务。计算服务不涉及无线电波的使用，所以不涉及谱效。表 5 给出了通信、感知和计算的效率指标的定义与需求。

表 5: 6G 效率指标

6G 效率指标	通信类指标	感知类指标	计算类指标
频谱效率	定义：每小区单位频率资源提供的吞吐量 要求：单位面积的 6G 平均频谱效率相比 5G 提升 2-3 倍	定义：完成一次感知任务所需的时频资源	N/A
能效	定义：单位能量所能传输的比特数，或传输 1 比特所需要的能量 要求：6G 网络能效相比 5G 提升 100 倍以上；6G 终端能效相比 5G 提升 10 倍到 100 倍	定义：完成一次感知任务所需的能耗	定义：单位能量所能提供的运算次数
成本效率	定义：每单位成本所能传输的比特数，或传输 1bit 所需要的成本 要求：6G 成本效率相比 5G 提升 100 倍以上	定义：完成一次感知任务需要的成本	定义：单位成本所能提供的运算次数

除上述量化的效率指标外，6G 系统的效率指标还包括以下方面。

- 灵活: 6G 系统易部署、易维护，支持系统功能的适配和裁剪，易于使能新的用例和新的商业机会，支持 5G 向 6G 的平滑演进。
- 智能: 支持基于 AI 的网络管理和运维，支持可编程的 6G 系统，实现网络资源的灵活高效管理。
- 绿色: 6G 除了需要具备相比 5G 更高的能效指标外，还可以考虑可再生能源在 6G 系统的使用，保证网络的可持续发展； 6G 还将支持通过环

境供能等方式实现极低功耗通信，从而极大提升连接可获得性，支持万物互联。

- **弹性：**6G 系统能够快速自动检测和识别网络异常、设备故障、操作失误和网络攻击，进而自恢复自治愈，保障网络和服务的可用性和鲁棒性。
- **安全、隐私与可信：**6G 提供通信、信息和计算服务，以及各类服务用例，需满足可信、安全与隐私的需求。例如，基础信息服务需要服从当地法律法规，确保数据信息的安全，保护用户隐私。融合计算需要考虑计算安全，存储安全，数据隐私，算法隐私等。

3.3 6G 应用场景

我们选取数据速率、移动性、时延、可靠性、流量密度和连接密度 6 项通信性能指标，以及信息类性能指标和计算类性能指标，然后按照性能指标重要性（高、中或低）将超强通信、基础信息和融合计算三类服务关联到选取的指标，如图 5 所示。其中，超强通信包括 eMBB 2.0、URLLC 2.0、mMTC 2.0 三个子场景。鉴于 6G 服务用例的多样性和 6G 系统的可扩展性，除上述五个应用场景外，6G 还将提供基于超强通信、基础信息和融合计算服务的能力边界范围内的更多柔性场景。



图 5：6G 应用场景

4 6G 使能技术

如前所述，相比 5G，6G 将进行性能提升和服务扩展，表 6 汇总了 5G 服务与 6G 服务的不同特征。

表 6：5G 服务与 6G 服务

服务类型		5G 服务	6G 服务
通信	基础电信业务	基础电信业务，VoNR，新通话，5G 消息等	XR、全息远程呈现、多感官互联等
	数据连接	按需移动数据连接	更高性能的按需移动数据连接
信息		UE 定位，少量网络信息	原生支持包括无线感知、增强的网络信息开放、以及行业公共信息在内的信息服务
计算		边缘计算	原生支持融合计算服务，包括算力，AI，存储，通信等

为了支持 6G 服务与能力，如图 6 所示，一方面需要设计 6G 系统功能框架，以支持丰富多彩的 6G 服务用例；另一方面，需要研究关键使能技术来满足 6G 系统的各种性能指标与效率指标。

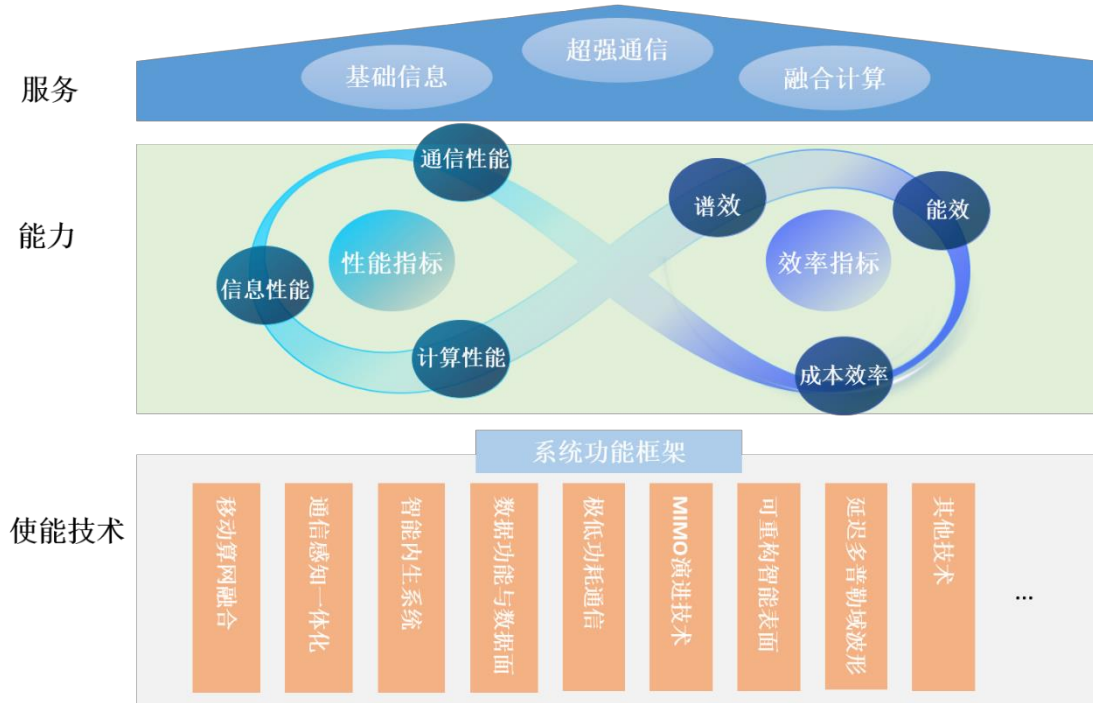


图 6：6G 服务、能力与使能技术整体逻辑图

4.1 系统功能框架

5G 主要提供通信服务，包括基于 IMS 的话音、5G 消息和 5G 新通话服务，并提供基于 LMF（Location Management Function，定位管理功能）的定位服务。现有中心云或 MEC 提供的计算服务是 5G 承载的应用数据，不属于 5G 系统范畴。6G 将对现有的通信服务和 IMS 通信服务进一步增强，并支持沉浸式 XR、全息远程呈现、多维感官互联等新业务的传输需求。同时，6G 提供的服务也将进一步丰富，支持基础信息服务和融合计算服务。

如图 7 所示，与 6G 服务相匹配，现有接入管理、移动性管理、会话管理、策略控制、用户面数据传输等通信功能需随之增强；同时需引入感知功能、计算功能和数据功能等新网络功能，以实现通感融合、移动算网融合、跨域数据交互和智能内生。从资源集角度，6G 将增加计算服务所需的计算资源和存储资源，并进一步扩展三大服务所需的频谱资源和有线传输网络资源，支持资源的动态管理与调度以满足系统柔性的需求。

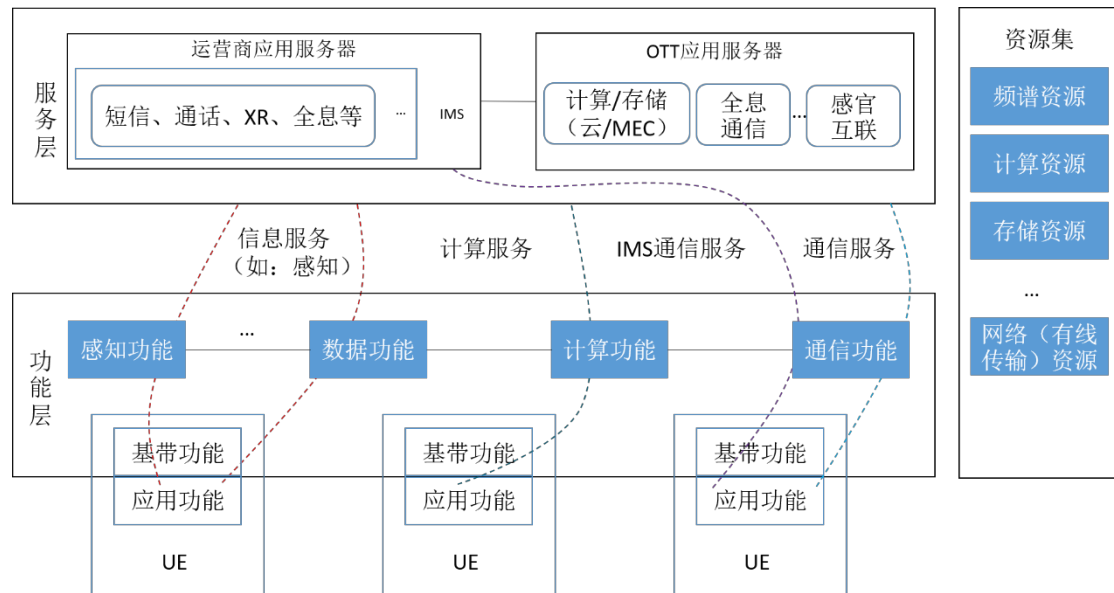


图 7：6G 系统功能框架

4.2 移动算网融合

移动算网融合聚焦 6G 系统内通信功能与计算功能的融合，为有算力需求的用户提供融合计算服务，包括常规计算和 AI 类的计算服务。6G 系统可通过统筹计算时延和通信时延来更好地支持计算数据传输，实现二者的实时动态适配。6G 网络功能节点具有更强的分布式特征，利用广泛分布的通信和计算融合节点实现计算服务，可缩短计算数据传输时延并降低骨干网络的传输负载。

无线通信网方面，6G 计算服务的潜在协议影响可能在 IMS 服务层、核心网网络功能层、或者无线接入网网络功能层等。有线传输网方面，IETF（Internet Engineering Task Force，互联网工程任务组）定义 CFN（Compute First Networking，算力网络），SRv6（Segment Routing over IPv6，基于 IPv6 的段路由）和 APN6（Application-aware IPv6 Networking，基于 IPv6 的应用感知网络）在传输协议中支持路由信息、算力状态信息和应用信息的及时交互，实现有线传输和算力的良好匹配。此外，无线通信网络与有线传输网络协同以支持端到端连接和算力的动态适配也是 6G 算力网络需考虑的一个方向。

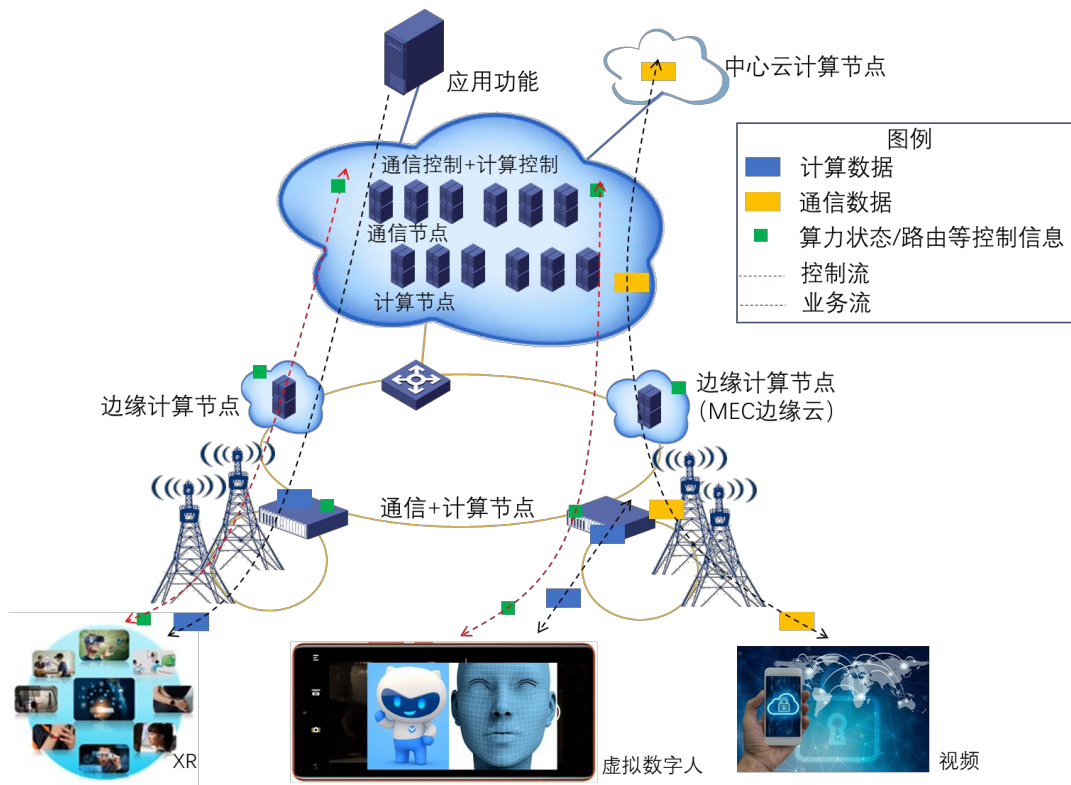


图 8：移动算网融合网络架构示意图

6G 系统中的计算功能可以为终端提供算力卸载服务，也可以提供在网计算服务。在网计算是指数据在应用功能与终端间、以及终端与终端间的传输过程中对所传数据进行计算的服务。如图 8 所示，终端可通过 6G 系统选择合适的计算节点从而获取计算服务。典型的融合计算的服务流包括以下几种：

- 终端向网络计算功能请求 6G 网络算力，网络计算功能将计算结果发送给终端；
- 应用功能/终端向网络计算功能请求 6G 网络算力，网络计算功能将计算结果发送给终端/应用功能；
- 终端请求外部算力，并获取计算结果，其中 6G 系统与外部云计算协作来动态调整所需传输性能和计算节点等。

移动算网融合的关键技术包括如下内容：

- 算力的度量与感知。算力的度量是算力网络的基础问题，基于计算、存储和网络等多个维度的统一度量可以为算力的感知、控制、管理和计费

提供统一规则。算力的感知，即对网络外部或网络内部的算力节点进行算力服务和算力状态的实时感知，可以快速选择计算节点以匹配计算服务需求，提供 QoE（Quality of Experience，体验质量）保障。

- 算力服务的控制与管理。当 6G 网络提供算力服务时，需依据计算需求确定是否进行计算任务分解，并为分解后的任务请求和协商算力资源。
- 计算承载的控制与管理。计算承载提供计算数据交互的连接通道，同时满足通信 QoS 和计算 QoS。计算承载的控制和管理包括计算承载的创建、更新、删除和 QoS 管理等。

4.3 通信感知一体化

通信感知一体化（简称为通感一体化）是 6G 系统提供基础信息服务的重要使能技术。通感一体化的典型用例与应用场景如表 7 所示。值得注意的是，通过感知获取的信道环境相关信息，也可以辅助通信系统进行信道估计、波束管理等 [17]，提升通信系统的性能。

表 7：典型的通感一体化用例与应用场景

通感一体化 用例分类	用例	应用场景
粗粒度感知	天气情况、空气质量的监测	气象、农业、生活服务
	车流人流的检测与数量统计、入侵检测	智能交通、安防监控
	目标定位与跟踪、测距、测速、测角	雷达的诸多应用场景
	环境重构	汽车/无人机的智能驾驶和导航、智慧城市（环境地图）

细粒度感知	动作/姿势/面部识别	智能交互、游戏、智能家居
	心跳/呼吸等生命体征监测	健康、医护
	成像、材料探测、成分分析	安检，工业，生物医药

为了给各种感知场景和用例提供统一的感知测量和上报的框架，表 8 中定义了三种层次的传感信息。

表 8：三种层次的感知信息

感知 层次	不同层次的 感知信息	感知信息的内容
1	接收信号或原始 信道信息	接收信号或信道响应的复数结果，幅度/相位，I 路/Q 路及其相关运算结果
2	感知测量量	时延、多普勒、角度、强度及其多维组合表示
3	感知结果	目标是否存在、距离、速度、朝向、加速度、位置、轨迹、动作、表情、呼吸频率/心跳频率、成像结果、天气、空气质量、材质与成分等

通感一体化场景和业务对系统功能框架设计提出了新的要求，通感一体化系统需支持感知服务请求的接收、感知 QoS 保障、感知控制和空口感知，以及基于空口感知的测量量确定感知结果并生成感知服务请求响应。

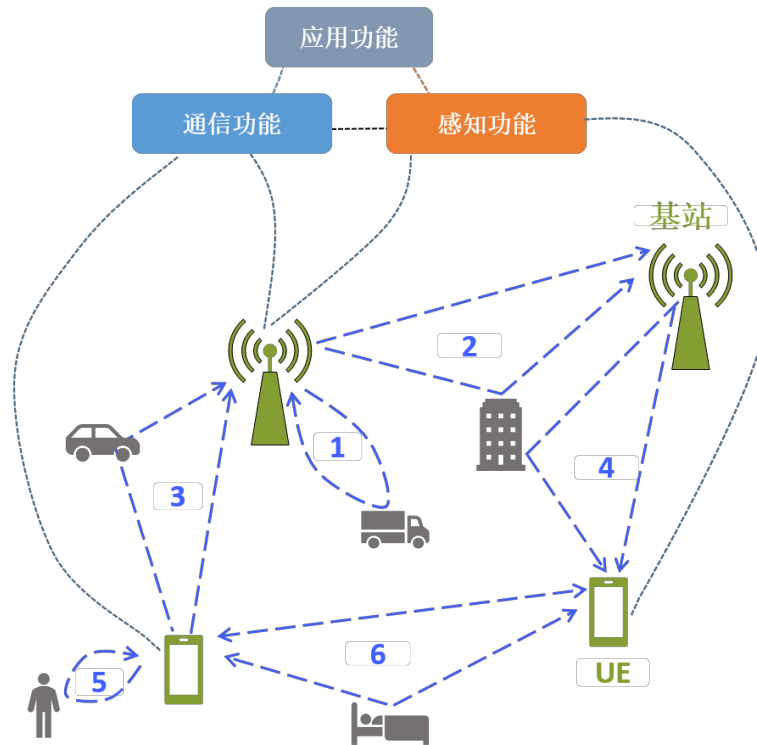


图 9：通感一体化系统功能框架

其中，感知 QoS 的定义可参考第三章感知服务性能指标的定义，感知控制主要包括：

1) 根据感知服务请求或感知 QoS 配置感知信号。感知信号类型包括参考信号、同步信号、数据信号等，感知信号配置包括感知信号的时域、频域和空域资源的配置等。

2) 确定感知服务请求所需的感知测量量以及测量配置。感知测量量如表 8 的 1 层和 2 层感知信息所示，测量配置包括需测量的感知信号的指示信息和感知测量量的传输格式等。

3) 确定感知信号收发节点。感知信号发送或接收节点包括网络设备（如基站）和 UE 等。不同的感知信号收发节点构成了不同的感知方式，感知方式包括基于 Uu 的感知（图 9 中的 3 和 4），基于侧行链路 sidelink 的感知（图 9 中的 6），基站或 UE 的单站感知（图 9 中的 1 和 5），基站间的双站感知（图 9 中的 2）。

除上述的感知功能外，感知能力注册和交互、感知安全隐私、感知计费也是

通信感知一体化的重要功能。

通感一体化系统的关键空口技术包括波形设计，多天线感知技术，感知算法设计，干扰消除技术等。

- 波形设计。波形设计是通感一体化的关键，具体包括以下几种设计思路：基于通信波形实现通感一体化，基于感知波形实现通感一体化，以及设计全新通感一体化波形。现有通信波形包括 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）、SC-FDE（Single Carrier Frequency Domain Equalization，单载波频域均衡）、OTFS（Orthogonal Time Frequency Shift，正交时频空）等通信波形，基于通信波形的设计思路是保证通信信息传输效率的前提下实现感知功能；感知波形包括 FMCW（Frequency Modulated Continuous Wave，调频连续波）等，基于感知波形的设计思路则是保证感知参数估计性能的前提下传输通信信息；全新通感一体化波形设计目前仍处于研究初期，需要考虑通信与感知性能的权衡，根据一体化性能指标进行波形参数设计，实现整体性能最优。
- 多天线技术。通感一体化系统需要支持多天线技术来提升通信性能和感知性能。以相控阵雷达和 MIMO 雷达为例，前者使用整个天线阵列进行波束赋形，能够形成高增益、高指向性的窄波束；后者利用波形分集以及虚拟阵列特性，获得相对于同等孔径的相控阵雷达更高的探测/估计分辨率、更高的最大可识别目标数、以及更好的杂波抑制能力[18]。面向通感一体化的大规模 MIMO 硬件架构与天线阵列设计、预编码/波束赋形方案设计等是通感一体化系统的研究重点。
- 感知算法设计。与通信系统不同，感知系统通常使用未经调制的发射信号，利用周期图、MUSIC（Multiple Signal Classification，多信号分类）、ESPRIT（Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques，旋转不变技术估计信号参数）、压缩感知等参数估计算法，得到信道的幅度、角度、多普勒、时延等具体信息。通感一体化接收机需要根据通信感知功能划分以及相互之间的影响选择合适的处理算法。
- 干扰消除。通信系统的干扰主要包括小区间干扰和小区内不同用户间的干扰，

感知系统的干扰除了包括通信系统的干扰外还包括非感知目标引起的杂波干扰。此外，对于自发自收感知，还存在收发信机的自干扰，需要进行有效的收发隔离或自干扰消除。对于通感一体化系统，除了上述干扰外，还需要考虑可能的通信信号与感知信号之间的干扰。先进的干扰管理与抑制方案是保证通感一体化系统性能的关键。

为了实现通感一体化技术的落地应用，除了需要对上述关键技术进行研究之外，还存在以下挑战需要解决：

- 通信和感知的性能平衡与联合优化的问题。确定不同场景下通信和感知的联合性能指标，从理论层面上解决通信速率与感知精度之间的权衡问题，对通感一体化系统的设计、评估与优化具有重要意义。
- 面向通感一体化的信道测量与信道建模的挑战。面向通信的信道模型无法直接用于通感一体化场景。首先，面向通信的信道模型不区分感知目标和非感知目标，通感一体化场景的信道建模至少需要在一定程度上确定性建模感知目标和杂波的多径/多径簇。此外，面向通信的信道模型不支持自发自收的信道建模。在自发自收的感知方式下，感知目标的反射、散射特征需要在信道模型中考虑，回波信号所经历的信道相比通信信道具有两倍的路径损耗和额外的反射损耗（与感知物体 RCS 有关）。
- 非理想因素影响感知性能指标的问题。通过检测感知信号来提取准确的信道状态信息（CSI, Channel State Information），是满足感知性能指标的关键，而一些非理想因素会导致 CSI 测量误差。影响感知性能的硬件非理想因素主要包括：
 - 信号接收功率的不确定性。由于低噪声放大器（Low Noise Amplifier, LNA），可编程增益放大器（Programmable Gain Amplifier, PGA）等器件的非理想导致实际的增益调整与预期的有差异，进而影响估计的 CSI 幅度 [19]。
 - IQ 路不平衡。器件性能的局限性使得 I、Q 支路本振信号相位不能保证严格相差 90° ，I、Q 支路信号幅度存在差异以及存在直流偏置等，进而导致基带信号的正交性被破坏。

- 时钟非理想因素。收发端时钟偏差带来载波频率偏移（Carrier Frequency Offset）、取样频率偏移（Sampling Frequency Offset）、符号定时偏移（Symbol Timing Offset）等问题。此外，振荡器的非线性引入的噪声对输出载波进行随机调制，带来随机相位噪声，这些因素会影响对速度、距离等参数估计的准确性。

4.4 智能内生系统

近年来，AI 在计算机领域的图像识别、自然语言处理，机器人领域的运动控制、轨迹规划等多个方向获得了巨大的成功。若将 AI 技术应用于通信系统中，需要结合通信系统的需求和 AI 技术的优势，去解锁具体的用例。AI 主要可用来解决 6G 通信系统中的以下三类问题：

- 1) 通信系统中存在很多无法准确建模的问题，如功率放大器对信号的影响、实际信道和噪声（有色、无色）对信号的非线性影响等。而 AI 可以从大量无线通信数据中提取特征，更准确地完成复杂问题的建模。
- 2) 通信系统中不易获得闭式解或没有闭式解的问题，如信道随时间、频率的变化规律、UE 轨迹预测、流量预测、无线资源分配、多用户配对、覆盖优化、容量优化等非线性问题或非凸问题。AI 可以通过数据驱动的方式，总结出输入与输出之间的隐含关系，直接给出对应问题的解或近似解。
- 3) 通信系统中多个相关模块联合优化的问题。目前的通信中不同功能模块的优化是独立进行的，联合优化多个相关的功能模块难度较大，如跨层优化、多个 MIMO 相关信号处理模块的联合优化、信源信道联合编码，均衡译码联合设计等。AI 可以将多个相关的功能模块建模为一个神经网络，将复杂的多模块关联问题转换为简单的数据拟合或回归问题。

我们认为，6G 将是一个智能内生系统，在网管、核心网、基站和终端等网络实体均具备内生 AI 资源和能力，并相互协作，与 6G 的用户面和控制面等基本功能一起，实现 AI 的相关场景和用例。图 10 给出了一种网络智能内生系统架构，其具备如下特征：

- 网管、核心网、基站和终端四类网络实体都具备 AI 基本功能和 AI 资源

（计算、存储等）

- AI 资源使能数据管理功能、模型管理功能和控制功能
 - 数据管理功能包括数据收集、数据预处理、数据标注、样本库等
 - 模型管理功能包括基础模型库、模型训练、模型交互、模型推理、模型激活与去激活、模型监视、模型更新等
 - 控制功能指对数据管理功能和模型管理功能的策略和参数配置，可通过核心网或无线接入网的控制面功能完成
- 四个网络实体之间的 AI 基本功能可交互数据、模型和控制信息。例如，
 - 核心网的 AI 基本功能从大量终端的 AI 基本功能收集数据，完成模型训练后，为 UE 的 QoE 预测 AI 用例提供服务
 - 在基站 AI 计算资源有限的情况下，基站的 AI 基本功能可将收集到的数据和训练控制发送给网管的 AI 基本功能，请求网管执行训练，网管执行完计算后，反馈模型给基站的 AI 基本功能
 - 终端可从基站或核心网的 AI 基本功能下载模型到本地的 AI 基本功能，再为终端的 AI 用例提供服务
- AI 基本功能独立或者协作完成 AI 用例

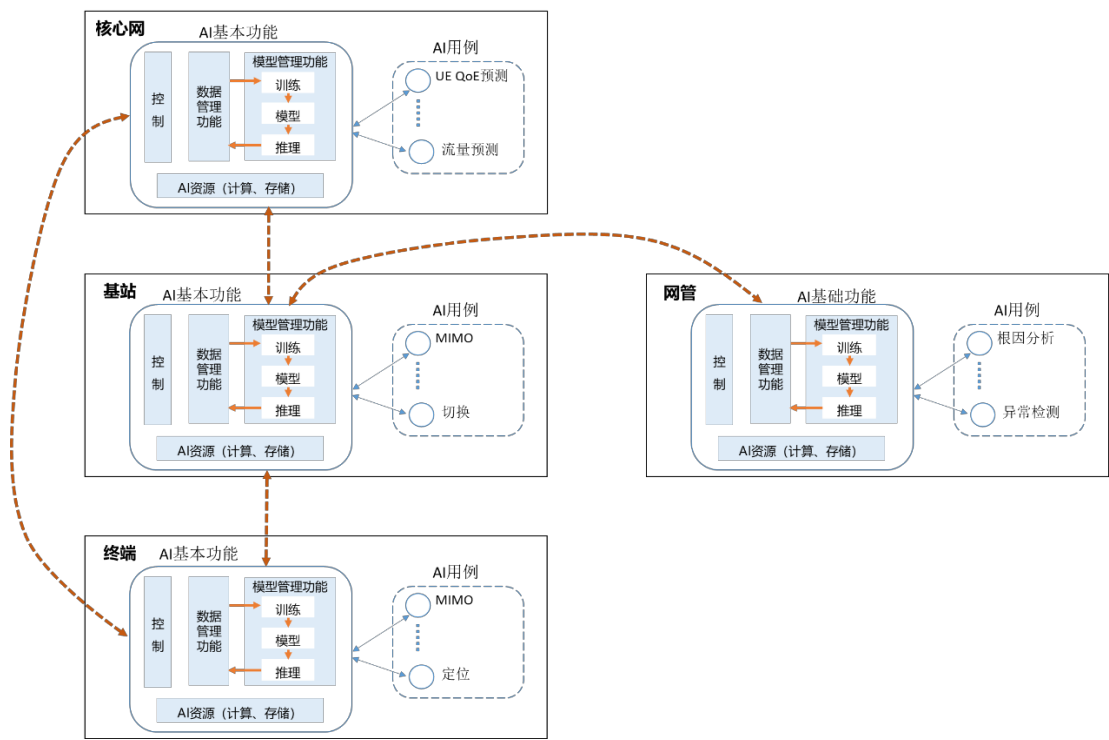


图 10: 智能内生系统架构示意图

如上所述，6G 智能内生系统是一个由核心网、网管、基站以及终端等网络实体紧密协作的系统。AI 用例是否需要在网络实体间进行信息交互以及是否需要协作，对该无线 AI 应用的算法和规范设计有很大影响。例如，按照图 11 所示的协作等级划分，在信令级协作（Level 1）中，生命周期管理需要在单侧进行或者两侧独立进行；而在紧密协作（Level 3）中，需要在两侧进行紧耦合式的使用寿命管理。



图 11: AI 使能的协作等级

智能内生 6G 系统另一个值得期待的特征是具备自演进能力：在运行过程中不断地收集数据、提取知识、与环境 and 用户迭代交互，自动化地实现旧模块的更新、淘汰以及新模块的衍生，逐步搭建更高效的通信系统。按照难易程度，自演进可划分为 4 个阶段：

- 阶段 A：AI 模型的参数可演进，但是 AI 模型的超参数、输入输出等都是固定不变的；
- 阶段 B：能够对 AI 模型的结构、模型、超参数等进行演进替换；
- 阶段 C：按照预设的规则，能够对现有模块进行更新、组合与删除，也能够自主寻找、发现新的模块；
- 阶段 D：能够自主确定和修改自演进规则。

将 AI 应用于具体的通信用例时，可以有多种应用方案。第一种是基于 AI 的单模块优化。例如基于 AI 的定位、波束管理、预编码、信道编码、信道估计、移动性管理、资源分配、或流量预测等 [20~22]。第二种是将相互关联的多个功能模块建模成一个 AI 模型，即基于 AI 的多模块联合优化。例如将信道估计、信道反馈和预编码等与 MIMO 信号处理相关的过程建模为一个联合问题[23]，以频谱效率作为全局损失函数，获得最优的 MIMO 传输方案。以物理层信号处理简化流程为例，图 12 给出了上述两种方案的示例。结合产业生态发展和标准化进展等多重因素，我们认为无线 AI 的应用方案会从基于 AI 的单模块优化开始，再逐渐实现基于 AI 的多模块联合优化。

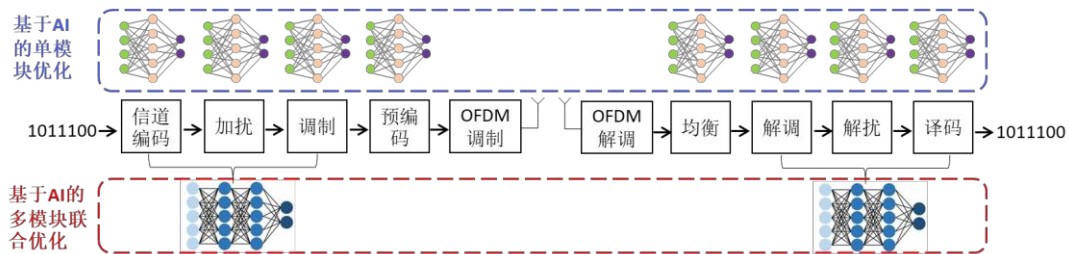


图 12： 物理层信号处理中基于 AI 的单模块优化和基于 AI 的多模块联合优化示例

下面通过几个例子介绍 AI 在通信系统中的应用。一个应用是通过一个基于自动编码器的 AI 网络，实现信道状态信息 CSI 的压缩与反馈[24]。图 13 描述了

基于 AI 的 CSI 反馈与基于 Type II 码本的 CSI 反馈（传统非 AI 方案）的性能对比，具体仿真参数详见文献[24]。在相同反馈开销下，基于 AI 的信道反馈可以获得约 10% 的频谱效率增益。

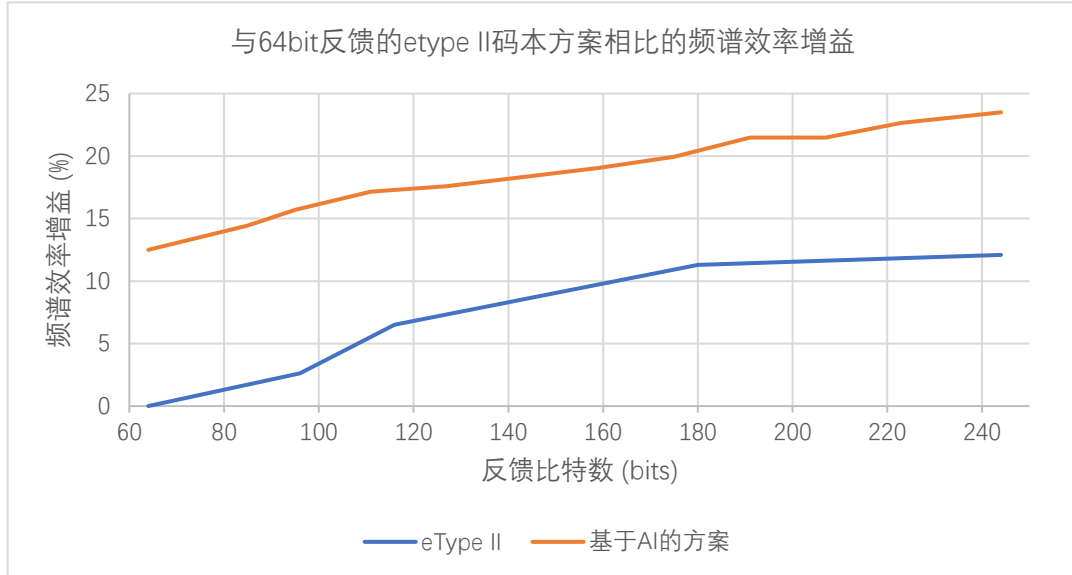


图 13: Urban Micro 场景下使用不同的信道反馈方案时的频谱效率增益

在基于无线信号的定位中也可以使用 AI 来挖掘参考信号与用户位置之间的隐含关系，实现高精度定位。图 14 描述了多种基于无线信号的定位方法的定位精度[25]，可以看出基于 AI 的定位方法的 90% 定位精度可以达到 4 米，而其他方案的 90% 定位精度均高于 20 米。

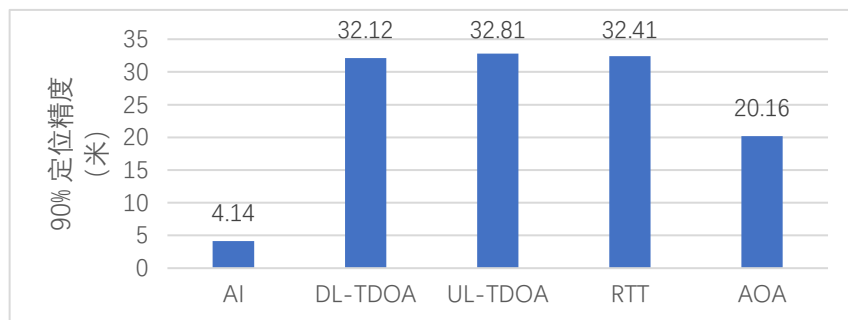


图 14: 多种基于无线信号的定位方法的定位精度

AI 也可以用来实现基于解调参考信号 (Demodulation Reference Signal, DMRS) 的信道估计问题，从 DMRS 所在时频资源的信道估计结果获得所有时频资源的信道估计结果[26]。针对这一实例，vivo 开发的原型系统测试显示，使用基于 AI 的 DMRS 信道估计，在 DMRS 资源开销降低一半的条件下也能获得比非 AI 方

案更低的误块率和更高的吞吐量。

智能内生 6G 系统也面临着诸多问题和挑战。首先，能否高效地进行数据收集是决定 AI 成败的关键。AI 需要大量的数据进行训练，而所需的数据中包含用户、运营商和厂商的隐私信息而不便于相互传递。对此，联邦学习（federated learning）[27]和群体学习（swarm learning）[28]将是一个重要的解决思路。其次，AI 模型本身存在泛化能力不足的问题，该问题在多变的无线通信环境中将被进一步放大。迁移学习（transfer learning）[29]、元学习（meta learning）[30]以及其他小样本学习可作为该问题的潜在解决方案。

行业对 6G 智能内生的理解不仅包括 AI 使能 6G 系统（即 AI 的对内服务），还包含 6G 系统对外提供 AI 服务（即 AI 的对外服务）。6G 系统中部署的 AI 资源通过合理编排可同时提供为对内服务和对外服务。但对内服务和对外服务在需求和体系架构方面存在较大差异。从需求方面来看，AI 对内服务和对外服务的用例存在很大的差异，问题模型、AI 协作方、数据走向、模型需求、AI 推理精度、实时性、算力需求等都存在很大不同，很难用高效率解决通信系统自身智能化的体系来满足千行百业对 AI 的个性化服务需求。从体系架构角度，对外提供 AI 服务往往建立在通信承载之上，所以需要经过更多的通信协议层次，额外的加密和隐私保护等。对内 AI 实例可通过 AI 与内生的各层协议信令完成数据收集、模型交互和管理等功能。另外，内生 AI 通常不需要计费和业务管控。智能内生系统架构与移动算网融合的对外 AI 服务架构能否高效融合有待进一步研究。

4.5 数据功能与数据面

数据是 6G 超强通信、基础信息和融合计算三大服务的公共需求。数据功能是通信感知一体化、智能内生系统和移动算网融合等使能技术的支撑技术。数据功能需要有效地满足多种服务的要求。

面向超强通信服务，数据功能需要进一步增强跨域数据协作、数据复用效率和时间累积效应。跨域数据协作包括核心网与无线接入网、终端、网络外部功能等之间的数据协作。数据复用需避免点对点方式中相同或类似数据的重复收集的问题。单个时间点的少量即时数据难以满足智能内生系统的需求，因此多个时间点的持久化数据有利于挖掘时间累积价值。

面向新服务（如感知、计算）的控制优化，数据功能提供网络功能和资源的实时状态数据，例如感知节点（如基站或 UE）的位置信息、移动速度、通信负载、计算负载等。面向用户级数据，数据功能将根据用户需求和授权支持其个人数据的产生、收集和存储，用户级数据控制和存储需由完全归用户个人所有的数据节点完成。如果未经用户授权，任何网络内外部功能均无法控制、访问和使用用户级个人数据。数据功能为个人数据保护提供监管和数据泄漏可追溯的技术支撑。

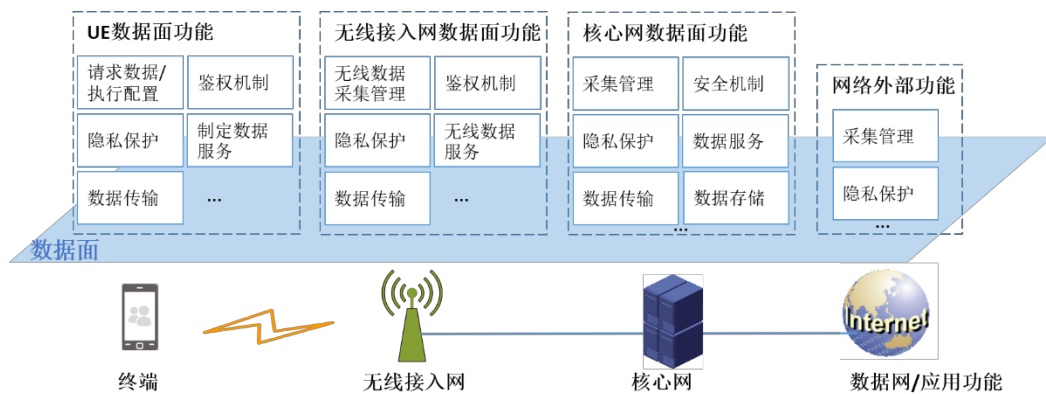


图 15:面向 6G 的数据功能与数据面

6G 数据功能提供网络所需的通用基础数据，包括网络设备级数据、UE 级数据和非 UE 级数据等，而不是应用功能间点对点的数据或通信控制数据。业务逻辑上，数据面需考虑向数据提供者付费，不同于用户面向用户收费的数据传输逻辑，也不同于控制面保障控制信息高优先级实时传输的逻辑。在安全性和移动性等方面，数据面需求与用户面和控制面的需求也不相同。潜在数据面的数据终结点可位于核心网、无线接入网或 UE，UE 数据功能和网络数据功能之间的对等性增强。因此，6G 数据功能方案需优先考虑满足多种服务和功能需求的整体方案，应避免满足单个服务或功能需求的碎片化叠加方案。

数据面是一种潜在的技术方案，由核心网数据面功能、无线接入网数据面功能和 UE 数据面功能组成，具有端到端的连通性。数据面负责数据收集、隐私安全、数据分析、数据预处理和数据存储等功能。数据面的引入有助于提升网络侧功能分工协作的逻辑清晰度和终端设计的灵活性，数据面的关键技术包括如下内容：

- 数据定义和分类。数据定义和分类是数据面的基础问题，数据范围从现有的 NWDAF（Network Data Analytics Function，网络数据分析功能）、SON（Self-Organizing Network，自组织网络）、MDT（Minimization of Drive Tests，最小化路测）、QoE 等方式下采集的通信相关数据扩展到包括通信、信息和计算服务相关的更多数据。数据的分类和分级可以从应用场景、数据来源、安全要求和数据量等维度进行。
- 支持多样化的数据交互关系。数据面的数据交互具有一点对多点、多点对一点、多点对多点，以及数据终结点在核心网、无线接入网或 UE 的多样性特征，因此数据面功能需高效灵活地支持多样化的数据交互需求。
- 隐私保护和安全机制。用户的隐私安全是数据服务必须支持的基础功能，信息和计算服务增大了用户隐私数据暴露的可能，因此用户数据的授权、收集和处理等的安全机制也需随之增强。此外，终端安全直接关系到终端原始数据的可信度，数据服务的鉴权机制能够防止恶意终端身份伪造等安全问题。当数据作为一种资源对外提供时，需要对数据服务的关键行为进行记录，便于监管部门对数据使用行为进行数字取证，以判断数据使用是否符合法律法规要求。

4.6 极低功耗通信

极低功耗通信具有低成本、低功率、大连接的特征，是泛在万物互联的使能技术。相比于现有 5G IoT 设备，6G 极低功耗通信设备部署成本将更低；功耗进一步降低，达到微瓦级别，甚至零功耗；功能进一步增强，除了支持百米传输百 Kbps 数据速率的通信功能之外还将支持感知或定位的功能，从而使能物理世界和数字世界的互联互通。

极低功耗通信的典型应用场景可以成为两大类。一类是广域覆盖场景，具体包括物流仓储、环境监测、智慧农业、铁路运营维护、电力巡检、工业物联网等；另一类是局域覆盖场景，具体包括智能家居、可穿戴设备连接、低功耗健康监测、植入式医疗等。

极低功耗发送技术

反向散射通信（Backscatter Communication）是极低功耗通信最具代表性的技术。原理上，反向散射通信设备通过调节其内部阻抗来控制电路的反射系数，从而改变来自其它设备或者环境中的射频信号的幅度、频率、相位等，实现信号调制。典型的反向散射通信的硬件模块包括：天线单元、能量采集模块或供能模块、微控制器、信号接收模块、信道编码和调制模块、存储器或传感模块等。除了上述典型的构成模块之外，反向散射通信设备可集成低功耗放大器模块，用于提升接收灵敏度和反向散射信号功率。

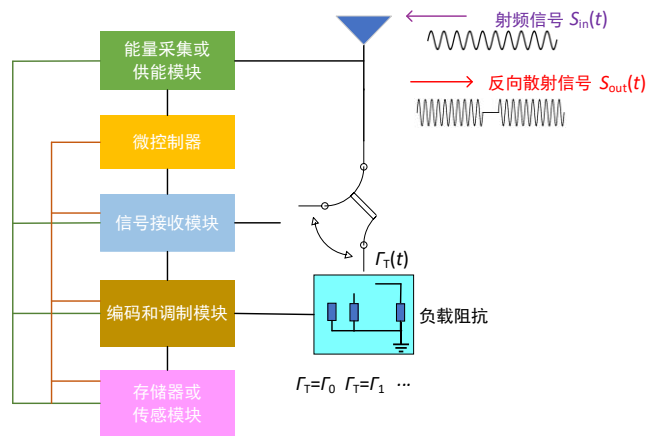


图 16：反向散射通信硬件系统架构与调制原理

受限于反向散射调制电路硬件能力与储能能力、射频源的发送功率、双程链路衰减、反向散射通信设备的接收灵敏度与收发天线增益、载波泄露的自干扰与跨链路干扰的影响，其速率、覆盖、连接、可靠性等空口技术都需要增强。为了实现反向散射通信更广泛的应用，其中的关键技术包括：

（1）速率提升技术：采用 APSK（Amplitude Phase Shift Keying，幅度相移键控）、QAM（Quadrature Amplitude Modulation，正交幅度调制）等高阶调制可有效提升传输速率，此外毫米波通信、MIMO 等技术也被应用于反向散射通信，用来提升传输速率。vivo 通信研究院联合北京交通大学搭建的高速率反向散射通信试验平台已经实现了 4ASK（4-ary Amplitude Shift Keying，四进制幅移键控）和 QPSK（Quadrature Phase Shift Keying，正交相移键控）等高阶调制，通信速率达到了 2Mbps，验证了基于高阶调制实现高速率反向散射通信的可行性。

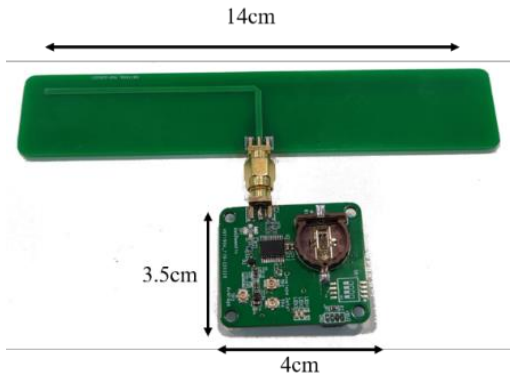


图 17：反向散射通信原型样机

（2）覆盖增强技术：采用分离式双基地架构[31]、MIMO 波束成形技术，以及高效率的能量采集电路，都是提升反向散射通信覆盖的有效方式。此外，通过在反向散射通信设备中集成负阻抗放大器等来放大反向散射信号的信号功率也可以有效地提升反向散射的覆盖距离[32]。表 9 给出了不同系统参数配置下的反向散射通信链路预算。根据链路预算结果可知，基于终端辅助的双基地架构以及集成的低功耗放大器可有效的提升反向散射通信的通信覆盖，并实现百米级的通信距离，验证了反向散射通信与蜂窝网络结合的可行的。

表 9：不同部署架构和硬件结构下的反向散射通信距离对比

参数设置	基站直连 /没有放大器	基站直连 /放大器	UE 辅助 /没有放大器
载频 (GHz)	0.90	0.90	0.90
发送功率 (dBm)	36.00	36.00	23.00
射频源到反向散射设备的 距离 (m)	100.00	100.00	3.00
路径损耗 (dB)	71.48	71.48	41.03
放大系数	0.00	20.00	0.00
回程损耗 (dB)	8.00	8.00	8.00
反向散射设备的天线增益 (dB)	0.00	0.00	0.00
反向散射设备 EIRP (dBm)	-43.48	-23.48	-26.03

读写器天线增益 (dB)	6.00	6.00	6.00
读写器灵敏度 (dBm)	-92.00	-92.00	-92.00
反向散射链路 MCL (dB)	54.52	74.52	71.97
反向散射通信距离 (m)	14.17	141.75	105.78

注：对应图 19 中的基站直连架构和 UE 辅助架构

（3）可靠传输技术：通过对现有的信道编码方案进行创新，针对反向散射通信业务特性、信道条件和使用场景设计最佳码结构和低复杂度的信道编译码方案，可有效提升反向散射通信的可靠性、改善服务质量。延续编码调制联合设计的思想，通过联合设计码率更高的信道编码和信号波形，在保证低成本和低功耗的要求下可实现可靠的反向散射通信传输。此外，基于阻抗匹配电路调制特性设计出的空时分组码分集传输技术也可有效提高传输的可靠性[33]。

（4）干扰消除技术：通过收发通道隔离技术，比如采用收发天线分离的双天线结构、多端口的环形器、定向耦合器等；还可以考虑接收双路消除法、负反馈环路法、死区放大器抵消法等技术进行载波泄露干扰消除，可有效提高接收机的灵敏度。而针对双基地反向散射通信中的跨链路干扰，可基于射频载波信号的时域重复结构和频域结构特性并联合反向散射基带信号设计[34]，实现跨链路干扰消除。

极低功耗接收技术

低功耗接收包括唤醒和数据接收功能。低功耗唤醒技术[35]能够实现微瓦级的终端待机功耗，大幅提升终端设备的电池寿命。除唤醒功能外，还可以实现较低速率数据接收，如功耗在 10uW~100uW 能够实现 10Kbps~1000Kbps 的数据速率接收。

非相干检测接收机是实现极低功耗接收的关键技术之一，通过包络检波直接将信号变换到低频处理，通过包络检波检测接收信号的幅度，有效降低了接收机射频复杂度，将功耗降低至原来的 1/1000~1/100，即降至微瓦量级。非相干检测虽然可以实现功耗的大幅度降低，但同时也会带来接收灵敏度的损失，通过设计

合适的传输信号波形可以有效的提升低功耗接收机的通信范围。低功耗接收机在接收有用信号的同时也接收到共信道和邻信道的干扰，导致有用信号的误检和漏检。通过集成射频/中频/低频滤波器、比较器门限调节、调制信号扩频设计等方式可有效进行干扰抑制。vivo 通信研究院联合电子科技大学搭建的极低功耗接收硬件平台已实现接收灵敏度-73dBm、10kbps 数据速率的信号接收。按照先进制程 CMOS 工艺评估，接收机功耗可实现几十微瓦，验证了极低功耗条件下的高灵敏度数据接收的可行性。

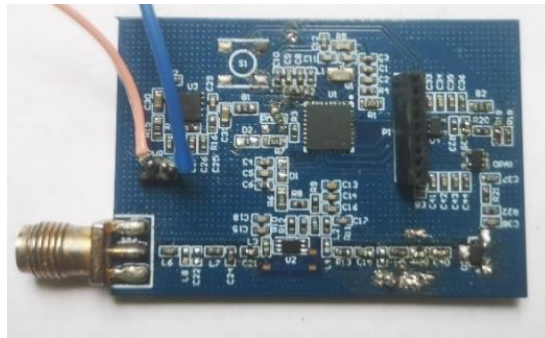


图 18：极低功耗接收技术原型样机

极低功耗通信的系统设计

6G 蜂窝通信中引入极低功耗通信包括两种模式。模式一为基站直连模式，即基站和极低功耗通信设备直接连接，完成上下行数据的收发。这种部署架构对基站和极低功耗通信设备的接收灵敏度要求都很高，但网络部署简单。模式二为 UE/relay 辅助模式，即极低功耗通信设备的上下行链路中至少有一条链路需要 UE 或 relay 参与。这种模式可以有效改善极低功耗设备的通信性能。

传统蜂窝系统复杂的网络架构和协议会给极低功耗通信设备的功耗和成本带来新的挑战，因此需要设计适合于极低功耗通信设备的简化网络协议架构。如图 19 所示，架构一为极低功耗通信设备不接入核心网，在这种架构下，网络设备负责极低功耗设备与应用服务器之间的数据传输。架构二为极低功耗设备接入网络运营商核心网，通过核心网管理极低功耗设备，并与应用服务器之间传输数据。为了降低极低功耗通信设备成本和功耗，其本身不需要支持复杂的网络管理和 NAS 协议栈，可通过其接入的终端设备或者基站作为代理，支持核心网对极低功耗通信设备鉴权，简单的移动性管理以及精细化的通信服务等功能。

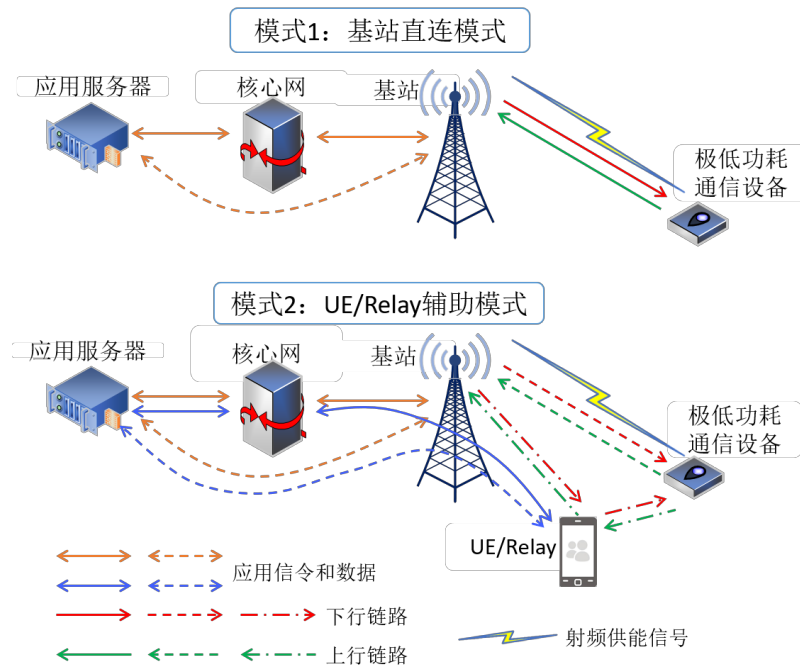


图 19：极低功耗通信与蜂窝通信融合的网络架构

为了实现 6G 极低功耗通信的实用化，还存在以下技术挑战亟需解决：

- 同步精度受限。受限于极低功耗通信设备的成本和功耗，电路中内置的无源晶振存在采样时间不准且随时间漂移的特性，影响通信性能和网络容量。不增加设备成本和功耗的情况下，解决晶振稳定性差带来的同步问题是极低功耗通信走向实用化亟需解决的问题。
- 超大规模连接。未来的 6G 通信网络需要支持海量的极低功耗通信设备，其连接密度相比 5G 提升了 10-100 倍。传统基于冲突避让和基于调度的正交多址方式很难适用于大规模极低功耗设备的接入，因此需要设计新的多址接入技术来保证海量极低功耗通信设备的连接需求。
- 极简协议栈研究。考虑极低功耗通信设备的成本、功耗、复杂度等的限制，需要研究和设计极简协议栈、轻量化安全机制来满足业务需求。

4.7 MIMO 演进技术

多天线技术与 OFDM 技术的融合提高了 5G 通信系统性能。6G 系统不仅需要实现更高数据速率、更高的频率和能量效率，还要关注特定区域的用户体验，例如小区边缘的覆盖性能和热点超密集区域的通信性能。6G 多天线技术的演进

主要方向包括更大规模的尤其是面向更高频段的集中式 MIMO 技术, 和包括 cell free MIMO 组网技术在内的超大规模的分布式 MIMO 技术。

随着通信频段提高, 波长变小, 同样面板上集成的天线单元数增多。6G 基站尤其是高频段的 6G 基站将会使用更大规模的天线阵列, 提供更加精细的波束赋形。无线设备的近场[36]范围 $D_{NF} = 2d^2/\lambda$, 取决于设备天线阵列尺寸 d 和无线信号的波长 λ 。在近场通信范围内, 波束赋形的目标不仅是波束方向, 还需考虑用户位置。因此, MIMO 技术将从远场波束赋形演变成近场波束赋形, 最终向着精确生成任意形状波束的全息 MIMO 的技术方向发展。

针对干扰受限场景, 分布式 MIMO 技术可以降低小区间干扰对小区边缘用户的影响。分布式 MIMO 方案可以是多基站或者多 TRP (Transmission Reception Point, 发送接收点) 的联合波束赋形, 也可以是基站与其他设备例如 RIS 或智能中继的协同传输。分布式 MIMO 根据无线设备能力不同提供不同的传输方案。同步精度高的分布式 MIMO 节点之间可以通过相干 MIMO 传输方式获得复用增益; 非同步分布式 MIMO 节点之间通过非相干 MIMO 传输方式获得分集增益。不同的分布式 MIMO 方案适用于不同的通信场景, 例如多 TRP 联合波束赋形适合补热场景, 基站与 RIS/智能中继协同适合补盲/补热和覆盖增强等场景。

Cell free MIMO 技术[37]适合密集多小区组网场景。Cell free MIMO 技术打破了传统的蜂窝小区边界, 将原本互相干扰的多小区转化为互相协作的分布式 MIMO 网络, 大大提升无线系统的覆盖性能, 改善用户的移动性性能。为了兼顾单位面积的频谱效率和用户移动性, cell free MIMO 技术可基于两层网络的控制与数据解耦方案 (图 20)。其中, 控制面网络主要负责控制面的信令与流程包括移动性管理等, 可以通过大规模节点组成 SFN (Single Frequency Network, 单频网) 的方式或者低频段宏站的传输方式为用户提供强覆盖高可靠的控制面功能。数据面网络主要负责用户面流程例如数据传输, 动态地为每个用户选择一个或若干个传输节点, 以分布式 MIMO 的传输方式为用户提供数据服务。

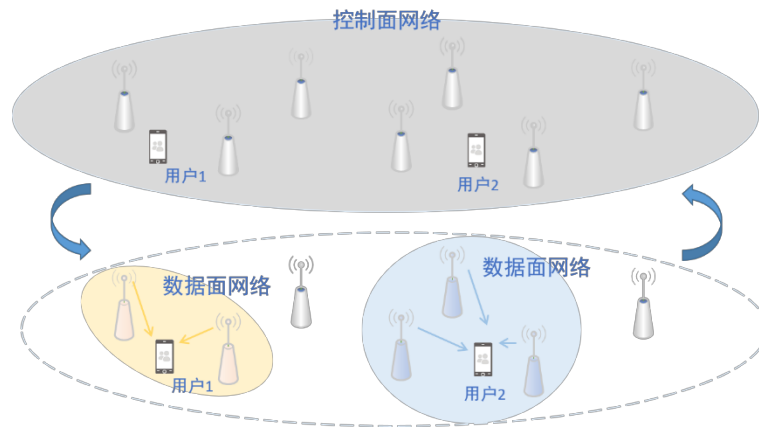


图 20: Cell free MIMO 组网示意

面向 6G 的超大规模 MIMO 技术也面临新的硬件技术和算法挑战。

- 超大规模 MIMO 系统的硬件复杂度和功耗问题。随着基站尤其是高频段基站天线数量的增多，导致基站的硬件复杂度和功耗大大增加。针对这个问题，可以使用稀疏 MIMO 阵列或稀布 MIMO 阵列的设计方案来降低基站成本和功耗。
- 分布式 MIMO 技术对基站的硬件性能提出更高要求。在射频侧，网络需要保证各个节点之间保证高精度时频同步来实现分布式 MIMO 传输；在基带侧，网络需要根据设备分组情况灵活的配置基带计算资源，包括在已知基站分组的情况下终端基带信号的合并处理，以及在未知终端信道环境的情况下广播信道的联合传输和处理。
- 6G MIMO 系统需要配置更多的时频资源用于信道测量和信道信息反馈。MIMO 通信系统需要提供高效的信道测量和反馈机制来兼顾数据速率和信道测量准确性。6G 高频通信可以借鉴轨道角动量 OAM 的信号特点，设计与 LOS 环境相配的天线阵列和码本集合，实现多流数据传输[38]。

4.8 可重构智能表面

可重构智能表面技术（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）[39]是一种低成本、低功耗、可灵活部署的硬件技术。RIS 设备通过独立的控制每个 RIS 单元中的可变器件（例如可变电容、PIN 二极管等），实现对 RIS 单元反射信号或者透射信号的电磁参数（例如，幅度、相位、极化方向等）的调控。大量 RIS 器件

单元调控后的反射信号或透射信号互相叠加，在宏观上形成所需的空間波束，从而实现对电磁环境的操控。RIS 技术与无线通信系统融合可以进一步提升无线通信系统的灵活性和传输效率。

RIS 技术可以作为通信系统中的独立节点增强通信性能。在弱覆盖场景下提供基于 RIS 的反射路径，可提升无线网络的覆盖性能。独立部署的 RIS 节点还可以根据无线网络的需求优化无线信号的传播环境，提升用户信号质量，例如提升多径环境下 MIMO 的秩，抑制其他小区的干扰信号。

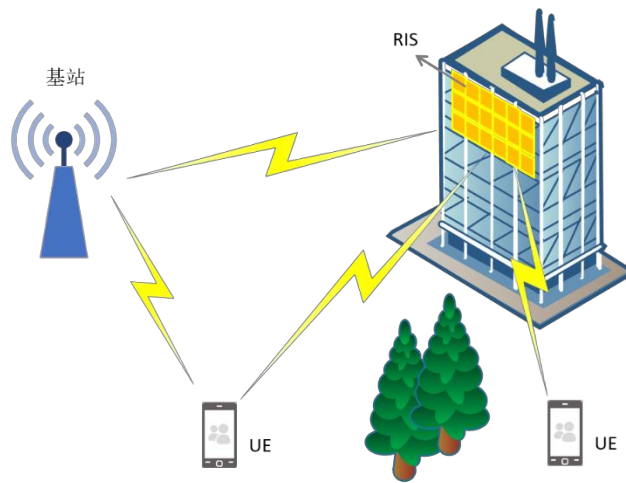


图 21： 利用 RIS 提升系统通信性能

RIS 技术应用于基站或终端设备，形成新型收发机架构。如图 22 所示，在基站射频单元规模受限的情况下，RIS 设备可以作为基站天线的进一步拓展，部署于基站上作为虚拟天线提供更精细的波束操控。更进一步的，利用索引调制技术，待传输的数据比特序列通过控制模块顺序映射为在不同时间单元的 RIS 状态，从而将无线信号转换为携带数据信息的调制信号。

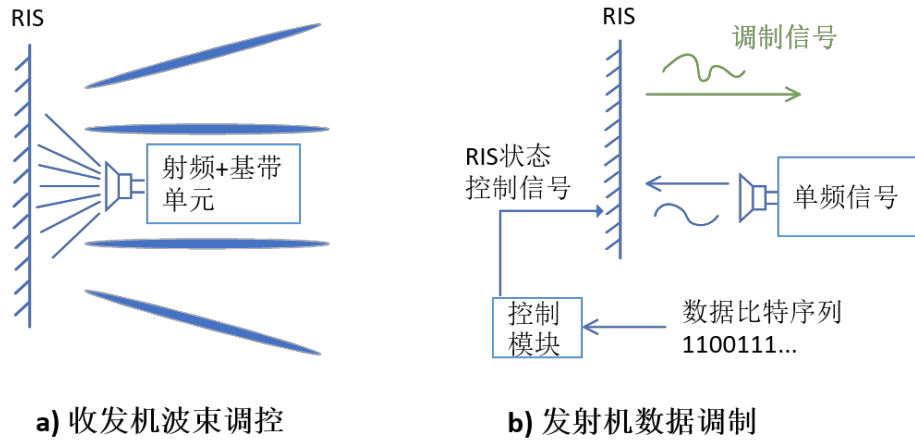


图 22： 利用 RIS 简化收发机架构

RIS 技术在提升系统性能的同时也带来了新的研究问题，包括 RIS 与通信融合的硬件设计问题和网络部署问题。

在硬件设计方面，RIS 设备的硬件参数需要与无线通信系统的工作参数相匹配。在多运营商多小区的实际部署场景中，RIS 设备会收到来自不同方向多个小区不同频段的无线信号。为了避免 RIS 设备对不相关的小区或者不相关频率的信号产生影响，RIS 设备的工作带宽需要与服务小区的工作带宽匹配。可以通过优化 RIS 器件单元的硬件结构将 RIS 设备的工作带宽逼近无线通信系统的工作带宽。如图 23 和图 24 所示，对于正方形 RIS 单元结构，附加的延迟线结构使工作带宽由 10GHz 下降到 1GHz [40]。另外，在 RIS 器件单元中增加滤波模块，例如频率选择性表面或滤波元件，进一步限制 RIS 设备的工作带宽。

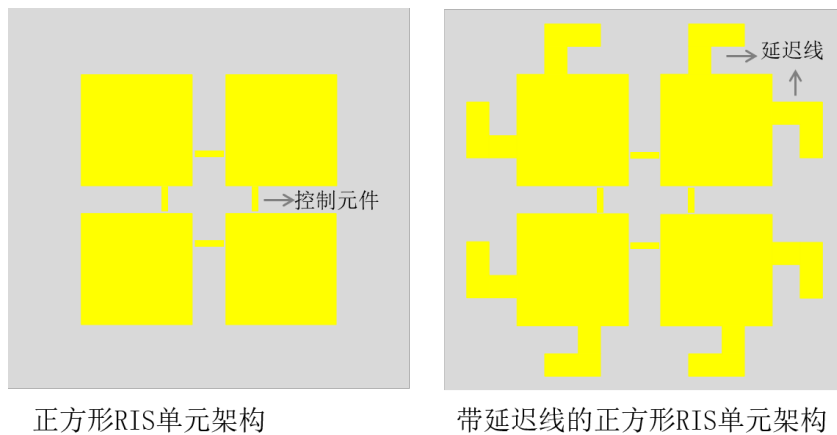


图 23： 增加延迟线优化器件单元结构

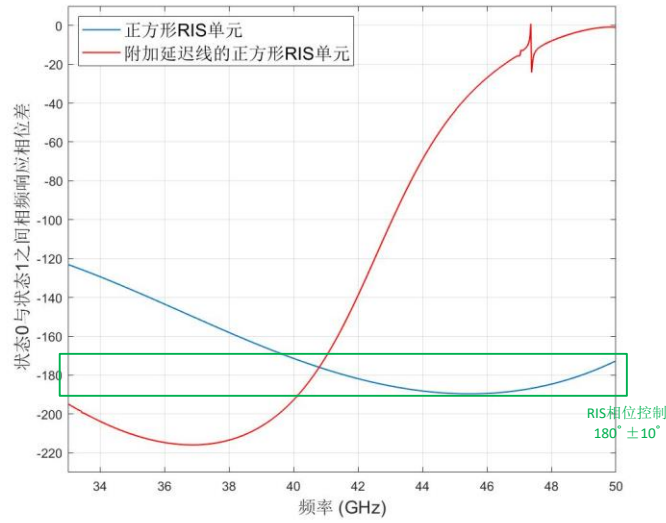


图 24： 优化器件单元结构对 RIS 工作带宽的影响

在网络部署方面，需要根据 RIS 设备的无源工作特点设计新的测量和调度策略。对于不具有独立信道估计能力的无源 RIS 设备，基于 RIS 的级联信道估计以及相应的 RIS 波束赋形是 RIS 与通信系统融合的必要前提。未来无线网络的 RIS 设备可能从少量定点部署演化到大规模分布式部署。6G 通信系统需要考虑 RIS 和基站协同的方式来实现 cell free MIMO 网络部署，来降低部署基站的成本和功耗。

4.9 延迟多普勒域波形

目前业界提出的新型波形技术主要可分为以下几类。一类是现有 NR 协议中使用的 CP-OFDM (Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 循环前缀正交频分复用) 波形的演进，初衷是为了克服 OFDM 的子带/子载波间干扰问题，其代表波形主要有 f-OFDM (Filtered OFDM, 滤波正交频分复用), W-OFDM (Windowed OFDM, 加窗正交频分复用), UPMC (Universal Filtered Multi-Carrier, 通用滤波多载波), GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing, 广义频分复用) 等[41~44]。还有一类波形是基于 QAM 调制技术，例如 FBMC-OQAM (Filter Bank Multi-Carrier with Offset QAM, 偏移正交幅度调制的滤波器组多载波), FBMC-QAM, WCC-FBMC-OQAM (Weighted Circular Convolution FBMC with Offset QAM, 加权循环卷积偏移正交幅度调制的滤波器组多载波)

[45~47]，其目的是大幅度降低 OFDM 的带外泄露，同时比前述基于滤波的技术复杂度更低。此外，MC-FTN（Multi-Carrier Faster than Nyquist，多载波超奈奎斯特）[48]通过引入载波间干扰或符号间干扰以及相应的非线性接收机算法来进一步提升频谱效率。

近年来，OTFS 调制技术[49]作为一种典型的延迟多普勒域波形，引起了广泛关注。OTFS 将信号的数字域处理和分析由时频域迁移到延迟多普勒域，利用延迟多普勒信道的稀疏性进行信号处理和分析，通过延迟多普勒域到时频域的转换获得发送信号的时频域分集增益，能对抗多普勒引起的载波间干扰。此外，其循环前缀的开销远低于 OFDM 系统，提升了频谱效率。

文献[49]中的 OTFS 波形需要进行较复杂的 ISFFT（Inverse Symplectic Finite Fourier Transform，逆辛有限傅里叶变换），复杂度较高，并且其时域波形沿用了 OFDM 的方波脉冲，会导致延迟多普勒域相邻格点间存在干扰。为了降低复杂度，减少延迟多普勒域相邻资源格间的干扰，目前学术界提出了两种类似单载波脉冲成型的方法，包括基于连续和离散 Zak 变换的延迟多普勒域调制波形[50，51]，以及 ODDM（Orthogonal Delay-Doppler Division Multiplexing，正交延迟多普勒分复用）[52]。

在面向应用的 OTFS 关键技术研究，需要重视以下几点：首先，由于 OFDM 仍然是很有竞争力的一种波形，需要考虑 6G 系统设计中 OFDM 与 OTFS 的共存。第二，目前的单点脉冲导频设计会造成 OTFS 时域波形的高 PAPR（Peak to Average Power Ratio，峰值平均功率比）问题，提高了硬件实现的难度，因此需要考虑低 PAPR 方案保证硬件的可实现性。第三，OTFS 与 MIMO 结合是实现高速移动场景下高传输速率的保证，需要考虑面向 MIMO-OTFS 系统的高效预编码机制。

- OTFS 与 OFDM 共存

利用 ISFFT 变换及信号采样的原理，通过将调制符号在延迟多普勒域的复制映射，等效为其变换符号在时频域上体现出的空载波或空符号。利用这些空置时频资源发送 OFDM 信号，实现二者的共存，提升资源复用效率，如图 25 所示。

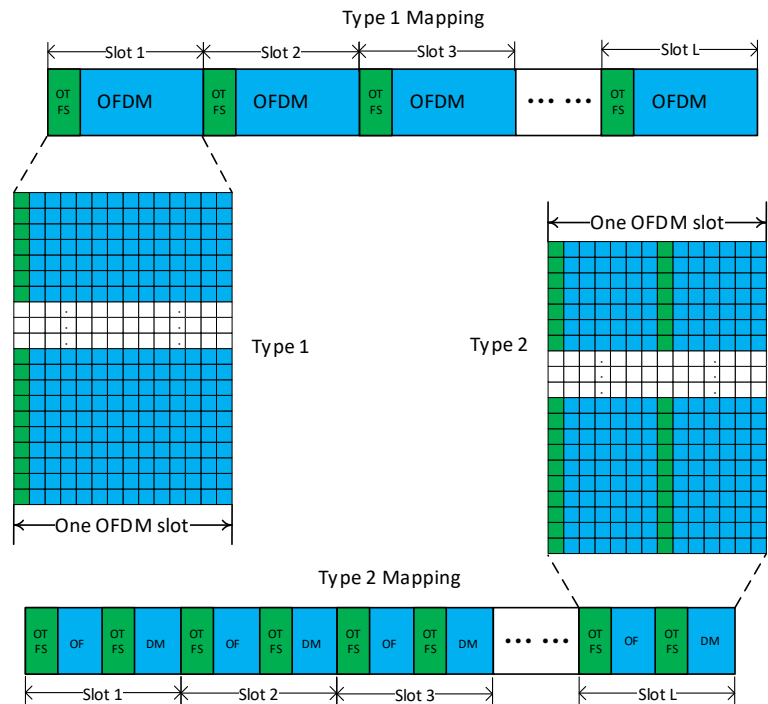


图 25: OTFS 和 OFDM 混合帧示例

- OTFS 的低 PAPR 导频设计

如图 26 所示的基于序列的导频设计实现了延迟多普勒域资源格上，每个延迟维度上的符号总功率相同，因此从根本上解决了高 PAPR 问题。

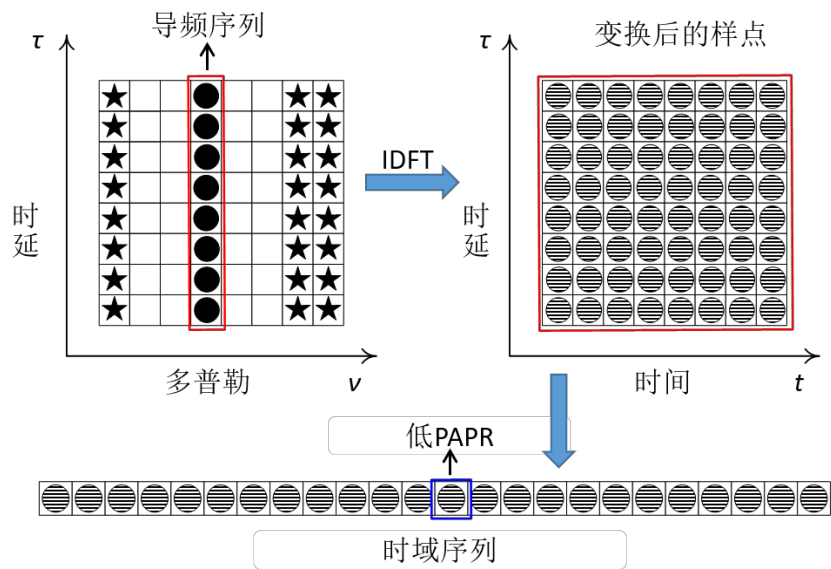


图 26: 低 PAPR 导频设计

采用所述方法后，通过观察图 27 的时域波形幅度图可以看出，高 PAPR 的现象改善明显。同时，由于导频序列在延迟维度展开，获得了在这一维度的分集

增益，使得其信道估计性能更优。

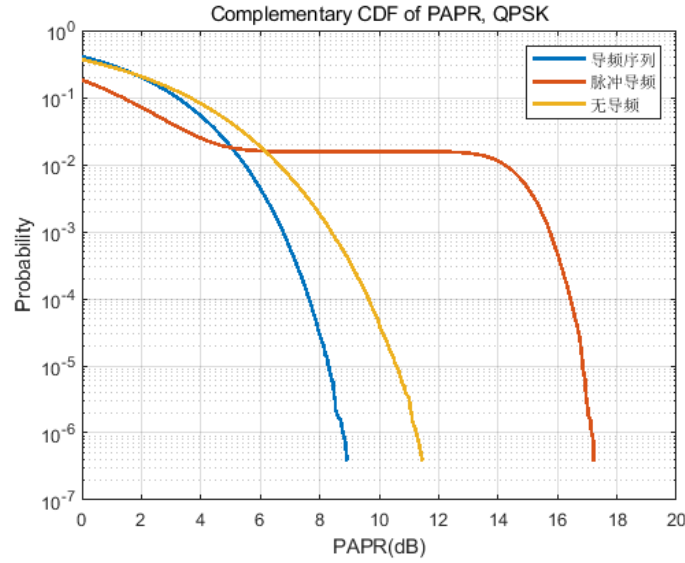


图 27：传统导频方案和所提导频方案的 PAPR 对比

- OTFS 与 MIMO 结合

针对 MIMO-OTFS 的一种开环分集编码方案如图 28 所示，将每个天线上的延迟多普勒域的帧沿多普勒方向等分为两个半帧，在两个半帧上分别映射两个层的数据。同时，设计了专门的保护间隔来解决半帧间的干扰和信道相位偏置问题。

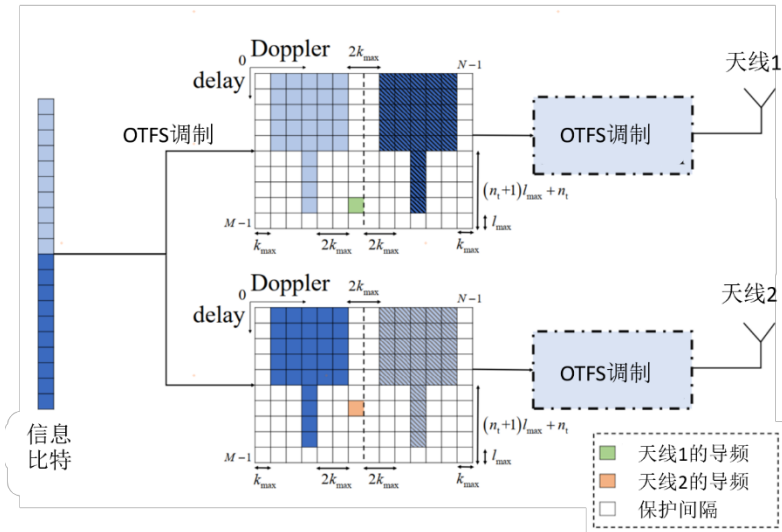


图 28：OTFS-MIMO 开环预编码

上述开环分集方案的误码率性能超过了采用 CDD 的 OTFS-MIMO 开环预编码方案，以及基于空时码的 OFDM-MIMO 开环预编码方案。详细的仿真假设和

性能增益请参考文献[53]。

OTFS 技术作为一个新兴技术，尚存在一些现实上的技术挑战，主要体现在以下几个方面：

- OTFS 在延迟和多普勒维度的分辨率受限，存在小数延迟和小数多普勒的场景，会导致信道估计不准确，容易引起接收机解调译码后误码率的错误平层。这种情况在使用高阶调制和多普勒谱连续的信道模型时尤为突出。如能探索出更好的导频设计方法和信道估计算法，则能进一步提升 OTFS 系统相对 OFDM 的信道估计增益。
- OTFS 如何与 MIMO 更好的结合尚待研究。目前的开环 MIMO 方案虽然实现简单，但是没有充分利用信道信息，性能提升有限。而在延迟多普勒域实现闭环 MIMO，由于延迟多普勒域信道的双卷积特性，存在复杂度和性能无法兼顾的问题。因此，需要进一步探索 OTFS-MIMO 的新设计，提升性能上限。
- OTFS 的均衡复杂度高于现有通信系统中广泛使用的线性均衡方法。目前 OTFS 低复杂度接收机[54]存在性能下降或开销较大的问题，亟需更好的设计方案。

4.10 其他技术

6G 频谱技术

6G 峰值速率和用户体验速率的需求，要求更大的系统带宽和更多的频谱资源。6GHz 到 7GHz 范围内拥有超过 1GHz 的连续频率资源，将成为重要的 6G 潜在候选频段。灵活频谱使用聚合更多的授权与非授权频率资源是在低频段实现大带宽高速率的重要手段。此外，毫米波和 sub-THz 是实现局域热点区域“补忙补热”的有效手段。

信道编译码技术

面向 6G 的潜在信道编译码方案包括以下几类技术：

- 面向新场景的信道编码。包括面向 100Gbps 以上数据速率的信道编码方

案、面向超高可靠超低时延的信道编码方案、以及面向极低功耗通信的低复杂度信道编码方案如基于 Polar、LDPC（Low Density Parity Check Code，低密度奇偶校验码）等的短码设计；

- 信道编译码模块与其他模块联合设计和优化。包括编码调制联合设计、检测与译码联合设计、信源信道联合编码等；
- 基于 AI 的编译码技术。例如基于 AI 的码构造，模型驱动或数据驱动的 AI 编译码方案，AI 辅助的译码方案等。

终端高能效通信技术

5G 终端实现百兆 bps 以上数据速率的功耗约为 1000 mW 量级（即能效为 10^{-8} J/bit 量级），6G 终端能效相比 5G 将改善 10 到 100 倍（即能效为 10^{-10} 到 10^{-9} J/bit 量级），意味着实现 1Gbps 数据速率的功耗可以达到 1000 mW 甚至 100 mW 以下，将大大提升高速率业务如 XR 的用户体验。

超大带宽传输和极简波形设计是实现终端高能效通信的潜在方案。一方面，通过极简波形来实现低复杂度的发送机和接收机，从而降低或者消除终端硬件（例如数模转换器，变频器等）的功耗；另一方面，通过超大带宽传输来保证低发送功率下的高速率需求。脉冲无线电是超大带宽极简波形的候选技术之一，其利用持续时间极短的基带脉冲来传输信息，具有以下优点：1) 脉冲信号在基带传播，不需要频域的复杂处理，相比 5G 设备能够节省变频器和频域均衡滤波器等硬件；2) 脉冲信号在射频前端是间歇性发送，所需功率极小；3) 脉冲信号的接收可以有效减轻多径效应，同时抑制多用户之间的干扰。终端收发机设计、调制编码方案设计、以及极简波形与传统波形的共存都是未来需要考虑的重点。

5 结束语

6G 将提供超强通信、基础信息、融合计算服务，成为构建自由连接的物理与数字融合世界的网络信息底座。

6G 服务能力定义需要综合考虑需求、技术和代价，平衡性能指标和效率指标。超强通信性能指标相比 5G 将有数倍甚至数量级的提升，并将进一步扩展覆盖。基础信息的服务内容更加丰富，包括感知、定位、网络信息、行业公共基础

信息等。融合计算服务将为用户提供端到端延迟和性能可保障的算力、存储或者智能化服务。

服务内容的扩展，服务能力的提升，需要系统架构重新设计，支持通信、感知、计算、信息、数据等功能与服务。移动算网融合实现了信号可达则算力可达、信号可达则智能可达；通感一体化设计为蜂窝无线网络打开了另一扇门；6G 内生智能系统可提高网络与空口效率，提升系统灵活性，降低运维成本；为了支撑智能内生系统、通感一体化、基础信息服务，端到端跨层数据面的引入尤为必要；极低功耗通信降低终端接入门槛，让连接真正无处不在；MIMO 演进、RIS 技术、新波形等技术引入，让 6G 无线网络的频谱效率更高，组网更灵活，适应场景更广，并更好的支持感知功能。

6G 关键技术的研发仍处于初期阶段，vivo 通信研究院将继续细化 6G 场景用例和对应的能力指标，深入开展 6G 潜在技术与试验验证，为全球统一的 6G 技术标准制定贡献力量。

参考文献

- [1] vivo, 数字生活 2030+白皮书, 2020 年 10 月
- [2] vivo, 6G 愿景、需求与挑战白皮书, 2020 年 10 月
- [3] NGMN, *6G use cases and analysis*, 2022 年 2 月
- [4] IMT-2030 (6G) 推进组, 6G 典型场景和关键能力白皮书, 2022 年 7 月
- [5] Next G Alliance, *6G Applications and Use Cases*.
- [6] Hexa-X, 6G Vision, *Use Cases and Key Societal Values*, February 2021.
- [7] IMT-2030 (6G) 推进组, 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书, 2021 年 9 月
- [8] ITU-R Recommendation M.2083, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, Sep. 2015.
- [9] 3GPP TR 38.913 V14.3.0 (2017-06), Study on Scenarios and Requirements for Next

Generation Access Technologies.

- [10] Hexa-X, Targets and requirements for 6G - initial E2E architecture.
- [11] S. Kingsley, S. Quegan, *Understanding radar systems*, SciTech Publishing, 1999.
- [12] Dinh C. Nguyen, P. Cheng, M. Ding, D. Lopez-Perez, P. N. Pathirana, J. Li, A. Seneviratne, Y. Li, and H. V. Poor, "Enabling AI in Future Wireless Networks: A Data Life Cycle Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 553-595, September 2020.
- [13] O. Poursaeed, T. Jiang, H. Yang, S. Belongie and S. -N. Lim, "Robustness and Generalization via Generative Adversarial Training," in *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 15691-15700.
- [14] H. Feng, S. Huang and D. -X. Zhou, "Generalization Analysis of CNNs for Classification on Spheres," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, pp. 1-14, December 2021.
- [15] U. Challita, H. Ryden and H. Tullberg, "When Machine Learning Meets Wireless Cellular Networks: Deployment, Challenges, and Applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 6, pp. 12-18, June 2020.
- [16] GSMA, Exploring the metaverse and the digital future, 2022.
- [17] A. Ali, N. Gonzalez-Prelcic, R. W. Heath and A. Ghosh, "Leveraging Sensing at the Infrastructure for mmWave Communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 7, pp. 84-89, July 2020.
- [18] J. Li, and P. Stoica, "MIMO Radar with Colocated antennas Antennas," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 106-114, September 2007.
- [19] Y. Zhuo, H. Zhu, H. Xue and S. Chang, "Perceiving accurate CSI phases with commodity WiFi devices," in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2017, pp. 1-9.
- [20] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang and Y. A. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, August 2019.
- [21] G. Zhu, D. Liu, Y. Du, C. You, J. Zhang and K. Huang, "Toward an Intelligent

Edge: Wireless Communication Meets Machine Learning," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 19-25, January 2020.

[22] N. Kato, B. Mao, F. Tang, Y. Kawamoto and J. Liu, "Ten Challenges in Advancing Machine Learning Technologies toward 6G," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 3, pp. 96-103, June 2020.

[23] F. Sohrabi, K. M. Attiah and W. Yu, "Deep Learning for Distributed Channel Feedback and Multiuser Precoding in FDD Massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 7, pp. 4044-4057, July 2021.

[24] R1-2203550, Evaluation on AI/ML for CSI feedback enhancement, vivo, RAN1 #109e, 2022.

[25] 3GPP R1-2203554, Evaluation on AI/ML for positioning accuracy enhancement, vivo, RAN1 #109e, 2022.

[26] 3GPP R1-2203556, Discussions on AI/ML for DMRS, vivo, RAN1 #109e, 2022.

[27] S. Niknam, H. S. Dhillon and J. H. Reed, "Federated Learning for Wireless Communications: Motivation, Opportunities, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 6, pp. 46-51, June 2020.

[28] S. Warnat-Herresthal, H. Schultze, K. L. Shastry, et al. "Swarm learning for decentralized and confidential clinical machine learning," *Nature*, vol. 594, no. 7862, pp. 265-270, 2021.

[29] M. Wang, Y. Lin, Q. Tian and G. Si, "Transfer Learning Promotes 6G Wireless Communications: Recent Advances and Future Challenges," in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 70, no. 2, pp. 790-807, June 2021.

[30] T. M. Hospedales, A. Antoniou, P. Micaelli and A. J. Storkey, "Meta-Learning in Neural Networks: A Survey," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, May 2021.

[31] N. Van Huynh, D. T. Hoang, X. Lu, D. Niyato, P. Wang and D. I. Kim, "Ambient Backscatter Communications: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2889-2922, May 2018.

- [32] F. Amato, C. W. Peterson, M. B. Akbar and G. D. Durgin, "Long range and low powered RFID tags with tunnel diode," in *2015 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2015, pp. 182-187.
- [33] H. Liu, W. Lin, M. Lin and M. Hsu, "Passive UHF RFID Tag With Backscatter Diversity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 415-418, May 2011.
- [34] G. Yang, Y. -C. Liang, R. Zhang and Y. Pei, "Modulation in the Air: Backscatter Communication Over Ambient OFDM Carrier," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 3, pp. 1219-1233, March 2018.
- [35] 3GPP, RP-213645, New SID: Study on low-power Wake-up Signal and Receiver for NR.
- [36] M. Cui, L. Dai, R. Schober, and L. Hanzo, "Near-field wideband beamforming for extremely large antenna array," arxiv:2109.10054, 2021.
- [37] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai and L. Hanzo, "Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, July 2019.
- [38] T. Hu, Y. Wang, X. Liao, J. Zhang, and Q. Song, "OFDM-OAM modulation for future wireless communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 59114-59125, May 2019.
- [39] M. D. Renzo, A. Zappone, M. Debbah, et al. "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, November 2020.
- [40] Q. Wu, X. Long, J. Yin, C. Yu, H. Wang, and W. Hong, "Single-layer 1-bit prephased single-beam metasurface using true time delayed unit cells," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 1095-1099, June 2022.
- [41] J. Abdoli, M. Jia and J. Ma, "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems," in *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2015, pp. 66-70.
- [42] R. Zayani, Y. Medjahdi, H. Shaiek and D. Roviras, "WOLA-OFDM: A Potential Candidate for Asynchronous 5G," in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1-5.

- [43] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFMC," in *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 2014, pp. 457-460.
- [44] N. Michailow et al., "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, September 2014.
- [45] F. Schaich, "Filterbank based multi carrier transmission (FBMC) — evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX," in *2010 European Wireless Conference (EW)*, 2010, pp. 1051-1058.
- [46] C. Kim, K. Kim, Y. H. Yun, Z. Ho, B. Lee and J. Seol, "QAM-FBMC: A New Multi-Carrier System for Post-OFDM Wireless Communications," in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015, pp. 1-6.
- [47] M. J. Abdoli, M. Jia and J. Ma, "Weighted circularly convolved filtering in OFDM/OQAM," in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, pp. 657-661.
- [48] J. B. Anderson, F. Rusek and V. Öwall, "Faster-Than-Nyquist Signaling," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 8, pp. 1817-1830, August. 2013.
- [49] R. Hadani and A. Monk, "OTFS: A new generation of modulation addressing the challenges of 5G," arXiv preprint arXiv:1802.02623, 2018.
- [50] S. K. Mohammed, "Derivation of OTFS Modulation From First Principles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 8, pp. 7619-7636, August. 2021.
- [51] F. Lampel, A. Alvarado, F. M. J. Willems, "Orthogonal Time Frequency Space Modulation: A Discrete Zak Transform Approach," in *2022 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2022, pp. 1-6.
- [52] H. Lin, J. H. Yuan, " Multicarrier Modulation on Delay-Doppler Plane: Achieving Orthogonality with Fine Resolutions," in *2022 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2022, pp. 1-6.
- [53] D. Wang, B. Sun, F. Wang, X. Li, P. Yuan and D. Jiang, "Transmit diversity scheme design for rectangular pulse shaping based OTFS," *China Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 116-128, March 2022.

[54] P. Raviteja, K. T. Phan, Q. Jin, Y. Hong and E. Viterbo, "Low-complexity iterative detection for orthogonal time frequency space modulation," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2018, pp. 1-6.

缩略语

英文简称	英文全称	中文
4ASK	4-ary Amplitude Shift Keying	四进制幅移键控
AI	Artificial Intelligence	人工智能
API	Application Program Interface	应用程序界面
APN6	Application-aware IPv6 Networking	基于 IPv6 的应用感知网络
APSK	Amplitude Phase Shift Keying	幅度相移键控
CFN	Compute First Networking	算力网络
CFO	Carrier Frequency Offset	载波频率偏移
CP-OFDM	Cyclic Prefix OFDM	循环前缀正交频分复用
CSI	Channel State Information	信道状态信息
DMRS	Demodulation Reference Signal	解调参考信号
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	增强移动宽带
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques	借助旋转不变技术估计信号参数
FBMC-OQAM	Filter Bank Multi-Carrier with Offset Quadrature Amplitude Modulation	偏移正交幅度调制的滤波器组多载波
FBMC-QAM	Filter Bank Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation	滤波器组多载波正交幅度调制
FLOPS	FLoating-point Operations Per Second	每秒浮点运算次数
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave	调频连续波
f-OFDM	Filtered OFDM	滤波正交频分复用
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing	广义频分复用
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
IETF	Internet Engineering Task Force	互联网工程任务组
IMS	IP Multimedia Subsystem	IP 多媒体子系统
IoT	Internet of Things	物联网

ISFFT	Inverse Symplectic Finite Fourier Transform	逆辛有限傅里叶变换
LDPC	Low Density Parity Check Code	低密度奇偶校验码
LMF	Location Management Function	定位管理功能
LNA	Low Noise Amplifier	低噪声放大器
LOS	Line of Sight	视距
MC-FTN	Multi-Carrier Faster than Nyquist	多载波超奈奎斯特
MDT	Minimization of Drive Tests	最小化路测
MEC	Multi-Access Edge Computing	多接入边缘计算
mMTC	Massive Machine Type Communication	大规模机器类通信
MUSIC	Multiple Signal Classification	多重信号分类
NAS	Non-Access Stratum	非接入层
NEF	Network Exposure Function	网络开放功能
NWDAF	Network Data Analytics Function	网络数据分析功能
OAM	Orbital Angular Momentum	轨道角动量
ODDM	Orthogonal Delay-Doppler Division Multiplexing	正交延迟多普勒分复用
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OTFS	Orthogonal Time Frequency Shift	正交时频空
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰值平均功率比
PGA	Programmable Gain Amplifier	可编程增益放大器
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QoE	Quality of Experience	体验质量
QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交相移键控
RCS	Radar Cross Section	雷达散射截面
SC-FDE	Single Carrier Frequency Domain Equalization	单载波频域均衡
SFO	Sampling Frequency Offset	取样频率偏移
SON	Self-Organizing Network	自组织网络
SRv6	Segment Routing over IPv6	基于 IPv6 的段路由

STO	Symbol Timing Offset	符号定时偏移
TOPS	Tera Operations Per Second	每秒万亿次运算
TRP	Transmission Reception Point	发送接收点
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier	通用滤波多载波
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications	超高可靠和超低时延通信
VoNR	Voice over New Radio	基于新空口的语音
WCC-FBMC-OQAM	Weighted Circular Convolution Filter Bank Multi-Carrier with Offset Quadrature Amplitude Modulation	加权循环卷积偏移正交幅度调制的滤波器组多载波
W-OFDM	Windowed OFDM	加窗正交频分复用
XR	Extended Reality	扩展现实