



6G改变世界

— 极致泛在 智慧随心 —





目 录

1 6G 愿景及应用场景.....	- 1 -
1.1 6G 愿景.....	- 1 -
1.2 6G 应用场景.....	- 2 -
1.2.1 智慧汽车	- 2 -
1.2.2 沉浸式游戏.....	- 3 -
1.2.3 健康生活	- 3 -
1.2.4 智能工厂	- 4 -
1.2.5 数字家庭	- 4 -
1.2.6 全息社交	- 4 -
1.2.7 智能陪护	- 5 -
1.2.8 智慧云购	- 5 -
1.2.9 智慧社区	- 5 -
2 6G 关键性能指标.....	- 6 -
2.1 超高速率	- 6 -
2.2 高速移动	- 6 -
2.3 网络能效	- 7 -
2.4 高精度的感知定位.....	- 7 -
2.5 极低时延、极高可靠性.....	- 7 -
3 使能 6G 的关键技术.....	- 8 -
3.1 极致：超高速率、精准可控.....	- 8 -
3.1.1 太赫兹通信	- 8 -
3.1.2 可见光通信	- 9 -
3.1.3 轨道角动量	- 10 -
3.1.4 智能超表面	- 11 -
3.1.5 超大规模天线阵列	- 12 -
3.1.6 确定性网络	- 14 -

3.1.7 至简网络	- 15 -
3.2 泛在：无所不在、触手可及.....	- 16 -
3.2.1 通信感知一体化.....	- 16 -
3.2.2 空天地海一体化.....	- 17 -
3.3 智慧：智慧内生、智慧无界.....	- 17 -
3.3.1 基于 AI/ML 的无线通信.....	- 18 -
3.3.2 智能内生网络	- 21 -
3.4 随心：按需分配、随心所欲.....	- 22 -
4 结束语.....	- 22 -
参考文献.....	- 24 -

图 目 录

图 1	6G 应用场景.....	2
图 2	6G-5G 性能指标对比图.....	8
图 3	太赫兹通信应用场景.....	9
图 4	可见光频谱示意图.....	10
图 5	轨道角动量回传链路场景.....	11
图 6	智能超表面应用场景.....	12
图 7	集中式和分布式大规模天线阵列.....	13
图 8	基于超大规模天线阵列的高精度定位.....	14
图 9	确定性网络要求.....	14
图 10	通感一体化示意图.....	16
图 11	空天地海通信网络示意图.....	17
图 12	基于 AI/ML 的端到端链路设计.....	18
图 13	基于 AI/ML 的信道估计.....	19
图 14	基于 AI/ML 的 CSI 反馈.....	20
图 15	基于 AI/ML 的信道编码.....	20
图 16	基于 AI/ML 的信道译码.....	21
图 17	智能化通信系统承载的智能应用.....	21
图 18	以用户为中心的网络.....	22

1 6G 愿景及应用场景

1.1 6G 愿景

从 1G 到 5G，蜂窝通信系统获得了长足的发展，可以支持广泛的业务，包括移动互联网、物联网等应用。然而 5G 网络仍然存在很多不足，如覆盖范围受限、业务场景受限，高速移动、密集热点场景下用户体验较差等等，这些都驱动着 6G 的发展。

随着通信理论的发展、材料科学的进步、人工智能/机器学习（Artificial Intelligence/Machine Learning, AI/ML）等学科的重大突破，6G 必将注入新的元素。通信理论的发展将进一步提升频谱使用的能力和效率。天线材料、导热散热材料、高频覆铜板基础材料、电磁屏蔽材料等材料科学的发展，推动理论转化为应用。在 6G 中引入 AI/ML，系统能够正确解读数据，学习和利用数据，并完成特定的目标和任务。相较于 5G 系统，智慧内生、内生安全等原生的技术特征将成为 6G 的主旋律。

6G 将构建空天地一体化的网络，通过星地融合，为用户提供全面、统一的业务接入，让用户能够随时随地无感知地接入网络，大幅度提高用户的业务体验，满足面向未来的多模交互、立体覆盖、全面智能、需求个性化和高度安全等需求。

随着数字化的加深，6G 的应用场景会更加多样化，业务类型也会更加丰富。6G 将具有更加广泛的包容性和延展性，6G 业务将不只是传统运营商所提供的业务，还有望在传统运营商之外产生新的生态系统。比如，针对垂直市场的本地网络将越来越普遍，这些本地网络将由不同的利益相关者部署，从而驱动“本地运营商”模式的发展，繁衍出新的生态模式。

6G 有望成为推动智能社会全面升级的重要驱动力，将人类的活动范围从物理空间拓展到虚拟空间。6G 将全面、灵活、高效地支撑物理世界的数字化，融合大数据、云计算、AI/ML、区块链等新技术，在广泛的领域做到万物智联，实现“极致泛在、智慧随心”的美好未来。

1.2 6G 应用场景

第五代（5G）移动通信系统已经进入了商用部署阶段。5G 所支持的增强型移动宽带（eMBB）、大规模机器通信（mMTC）与超高可靠、超低时延通信（uRLLC），使 5G 系统具备了实现万物互联的能力。随着 AI/ML 技术的发展，6G 不仅要满足互联互通，更要实现智联智通，并最终实现万物智联。

6G 将以人为中心，为用户提供“极致泛在、智慧随心”的服务。从个人到家庭，再到社会，6G 将从物理世界走向数字世界，彻底改变人类的生活方式，影响人类生活的方方面面。

6G 不仅能够提供全域覆盖，实现随时随地无障碍的接入服务，还将实现感知和智慧的融合，从而构建通信感知和泛在智慧的一体化网络。6G 将提供更加便捷、可靠、高效、智慧的极致服务，满足各类场景的业务需求，并最终实现“极致泛在、智慧随心”的 6G 愿景。本节将重点介绍 6G 的典型应用场景。



图 1 6G 应用场景

1.2.1 智慧汽车

人与交通工具，以及交通工具之间的信息交互，在未来将发生巨大的变化。具备完全自动驾驶功能的智慧汽车将成为重要的交通工具。智慧汽车将环境感

知、智能决策、智慧驾驶等功能融为一体，为用户提供极致的智慧出行服务。智能座舱系统为用户提供舒适的出行体验，自动驾驶系统为用户提供随叫随到的智慧出行。

借助于 6G 的高精度定位能力、泛在感知能力、内生智能的能力以及极致的通信能力，有望实现汽车的全面智能，从而给用户的交通出行带来全新的体验。

1.2.2 沉浸式游戏

虚拟现实设备被广泛应用于游戏领域。游戏玩家都想把自己置身于更加真实的游戏世界中，“亲身”经历唯美、惊险的旅程，体验紧张、刺激的游戏场面。在 6G 时代，沉浸式游戏是全息技术以及 XR 等高科技手段的融合，将拥有宏大的场景和超大规模的非玩家角色（Non-Player Character, NPC）。在 6G 时代，借助于 6G 的泛在通信感知能力，可以实现多感体验。比如，通过增加嗅觉和触觉感知，玩家可以身临其境地体会到清风拂面、花草飘香的游戏氛围；通过增加多感体验的功能，玩家也可以真实地体验到枪林弹雨的刺激，亦假亦真、亦实亦幻。

1.2.3 健康生活

目前，医疗市场的需求远大于医疗资源的供给，无法保证医疗、保健资源的按需分配。借助于 6G 超高可靠、超低时延的极致连接，未来有望实现实时的健康检测与看护，乃至实现即时的远程医疗。人们通过可穿戴设备，可以长期监测个人的身体状况，获得运动与健康的建议。如果身体的某些指标发生了变化，可穿戴设备会给出警示，除了监测身体状况外，可穿戴设备还可以个性化地提供膳食、睡眠、运动的建议，甚至自动地实施健康理疗，从而实现“治未病”，防范于未然，仿佛每个人都拥有一个不知疲倦的家庭医生。此外，可穿戴设备还可以兼具安全报警的功能，当行人与车辆相距太近时，会自动示警，从而减少交通事故的发生，保障行人的安全。

1.2.4 智能工厂

6G 网络将具有超大带宽、超低时延、泛在覆盖和超高可靠等特点，可以利用 AI/ML 和移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）技术检测、管理和控制工厂内的数字化设备，针对不同的目标下达相应的指令。6G 有望为智能工厂引入智能联邦学习和区块链技术，智能工厂的设备之间可以通过边缘节点直接进行数据交互，实现去中心化操作，从而降低能耗和传输时延。与此同时，借助 6G 通信技术，工厂内任何联网的智能设备均可实现灵活部署和快速调整，从而提高工业制造的“自适应”能力。智能工厂从个性化的需求到产品交付，实现不同环节的高效协同，从而实现“人财物，供产销”的优化调度与智慧流通。

1.2.5 数字家庭

数字家庭将以住宅为载体，融合物联网、AI/ML、通信感知、多模态等技术，实现家居设备的互联互通以及智慧管理。借助于 6G 提供的极致泛在的智慧连接，数字家庭以用户为中心，由 MEC 控制系统进行协同管理，使家居、电器设备实现智联智通，从而使用户获得随心随意的体验。例如：家庭影院设备提供多感融合的沉浸式体验；家庭安防系统提供居住安全和个人数据安全的全面防护；智慧管家提供定制化私人助理服务。基于此，家居、家电实现全面的数字化，用户可以随时随地对家中的任何智能设备实现远程控制。

1.2.6 全息社交

在 6G 时代，社交将打破时空的约束，基于 6G 超大带宽、超低时延的数据传输能力，用户可实时获取远端数据，得到全息态势信息。6G 网络的极低时延，将会使端到端的数据传输质量显著提高，使显示更加生动。用户可以通过裸眼全息的方式获得真正的沉浸式体验，高质量人像互动将带来全新的沟通方式和体验，让交流跨越时间和空间，真正实现“境随心生、身临其境”。

6G 时代的全息社交有望彻底改变人类的社交方式，带来生活、娱乐和工作方式的革命性变化。全息通信的广泛应用将会彻底打破时空对人类的限制，使

人与人之间的交流活动更加丰富多彩。

1.2.7 智能陪护

随着机械和 AI/ML 技术的发展，类人机器获得了长足的发展。在未来，人机交互将更加情景化、个性化，特别是在智能陪护方面。陪护机器人不仅能够随时监测用户的身体健康情况，进行护理，更能在精神上给予慰藉。它将拥有智能化的情绪管理系统，通过可穿戴设备或脑机接口进行情感监测，实时感应用户的情绪变化，及时进行情感疏导，向用户传递积极的情绪和思想，缓解负面情绪对人体的不良影响，使用户获得个性化的人文关怀。

借助于智慧泛在的 6G 网络，智能陪护机器人将被赋予更多的功能。为不同的用户提供个性化的服务，使人们的生活质量得到极大的提升。

1.2.8 智慧云购

5G 推动了移动互联网的快速发展，线上购物成为潮流，而 6G 将更加深入地变革人们的购物方式。目前的线上购物主要以图片、短视频的形式进行呈现，用户在选购时无法获得真实的体验，大大影响了人们的购物满意度，产生了部分退货行为。这种购物方式既影响了用户体验，又浪费社会资源。借助于 6G 极致泛在的连接能力，未来有望实现智慧云购。通过 XR、全息、通感技术，用户在购买物品之前就可以获得物品的试用体验。例如，用户想购买一台冰箱，可以通过全息投影将冰箱投影在家中预留的位置，并选择与家具、装修匹配的冰箱尺寸、款式、颜色。

1.2.9 智慧社区

智慧将是 6G 网络的关键特征，智慧化的网络可以为用户提供多种智能化的服务。借助于 6G 能力，可以整合社区中的各类资源，为社区群众提供娱乐、教育、医护等多种便捷的服务。

智慧社区将提供远超传统社区的服务，通过物业管理与服务系统的数字化、智能化升级，如门禁系统、电梯管理、远程抄表、自动喷淋、停车管理、视频

监控、快递寄存等，实现更加高效和智能的物业管理与社区服务。同时，智慧社区将以建筑与社区为平台，利用通信、AI/ML、自动化等技术实现智慧社区，并无缝地接入智慧城市，为社区居民提供高效、舒适、便利、安全的居住环境。此外，智慧社区也将为居民提供定制化的服务，对于家中有老人的居民，可以通过将智慧家居连接到智慧社区，实时监测老人的健康状况，以便及时地处理各种意外情况。

智慧社区的实现需要依托高速率、低时延且智慧化的网络。6G 网络在具备超高速率、超低时延的同时，将实现通信、AI/ML、算力的深度融合，为智慧社区提供有力的支撑。

2 6G 关键性能指标

为了满足新业务、新场景多样化的需求，6G 的无线接入技术和网络架构都需要引入新技术，借助于这些新的使能技术，6G 的关键能力将有大幅度的提升。下面将简要介绍 6G 的关键性能指标。

2.1 超高速率

6G 将为沉浸式游戏、全息社交等提供流量保障，使用户获得虚实融合的沉浸式体验。虚拟世界的构建需要进行海量数据的收集、分析、计算和传输，同时对网络传输速率提出了极高的要求，用户体验速率将从 5G 的 100Mbps 提高到 10Gbps，峰值速率将从 10Gbps 提高到 Tbps。

2.2 高速移动

6G 将保障高速移动用户的通信质量。移动性作为无线通信关键性能指标之一，5G 已经可以支持 500km/h 的移动速度，但仍然无法为飞机、无人机等场景的用户提供宽带接入服务。而对于高铁、动车等高速移动场景的覆盖和服务，用户体验也较差。6G 将实现全域覆盖并进一步支持 800~1000km/h 的移动速度，随时随地为用户提供服务。

2.3 网络能效

为了实现碳中和以及移动通信的可持续发展，节能将是 6G 的核心需求之一。随着高频段 5G 系统的部署，网络能耗让运营商越来越不堪重负。网络能耗已经成为 5G 大规模部署的制约因素。因此高能效是 6G 的必然需求，相较于 5G，6G 能效以提高 100 倍为目标，从而使系统在能耗不变的情况下将数据传输效率提高 100 倍。

2.4 高精度的感知定位

5G 对基于网络的定位进行了一系列的增强。随着新场景、新业务的发展，对定位提出了更高的精度要求。借助于太赫兹、通感一体化等技术，6G 有望实现高精度定位、成像和环境重建等功能。6G 定位精度有望达到室外 0.1m，室内 1cm 的目标。

2.5 极低时延、极高可靠性

随着智慧汽车、数字工厂等各种高实时应用场景的出现，对通信时延和可靠性有了进一步的要求。6G 在时延方面的性能相对于 5G 将会有 10 倍的提升，并且能够满足更高的同步和时延抖动要求。在可靠性方面，有望达到 99.99999%，甚至更高。

除了以上传统性能指标的变化，6G 还将定义新的指标来明确 6G 网络的性能，包括时延抖动、智能水平、安全等，这些能力将丰富 6G 业务和场景，从而为用户提供极致的服务体验。6G 在各个性能指标方面较 5G 系统将会有质的提升。

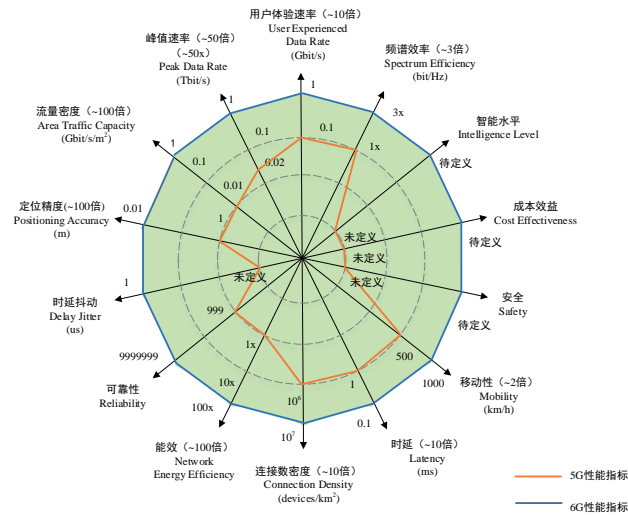


图 2 6G-5G 性能指标对比图

3 使能 6G 的关键技术

随着用户体验和个性化服务需求的不断提升，6G 需要满足新的性能指标以应对新的应用场景。6G 新能力也将引领新技术和新的网络架构，为了实现“极致泛在、智慧随心”的愿景，6G 需要在网络架构和潜在关键技术上取得突破。

3.1 极致：超高速率、精准可控

为了满足 6G 超高速率、精准可控的极致体验，需要一系列关键技术的支撑。下面我们将探讨与此相关的关键技术。

3.1.1 太赫兹通信

从 1G 到 5G，移动通信所支持的吞吐率越来越高，所需的传输带宽也越来越大。为了满足超大带宽、超高速率的数据传输要求，进一步拓展频谱资源成为 6G 发展的必然选择。尚未用于移动通信的太赫兹频段，被认为是 6G 的潜在频段。

太赫兹频段是频率位于 0.1THz-10THz 之间的电磁波频段，波长范围是 30 μ m-3mm。太赫兹频段具有频段高、波长短等特点，这些特性使得太赫兹在无损质量检测、医学成像、军事探测、保密通信、雷达通信以及卫星通信等领

域都获得了重要的应用。

太赫兹通信传播损耗高、传播距离短、指向性好，可适用于设备之间的安全接入、数据安全下载以及安全支付等安全通信场景。考虑到太赫兹通信对高速率和大带宽的支持能力，可以使用太赫兹频段实现热点覆盖及短距离的高速通信场景。

随着新兴材料产业的发展，原本存在瓶颈的一些技术获得突破并走向成熟，比如石墨烯。这可以使高速传输的片上通信系统有望成为现实。太赫兹频段电磁波的波长极短，未来有望实现毫米甚至纳米尺寸的通信设备，在极短的距离上实现超高速的数据连接应用。

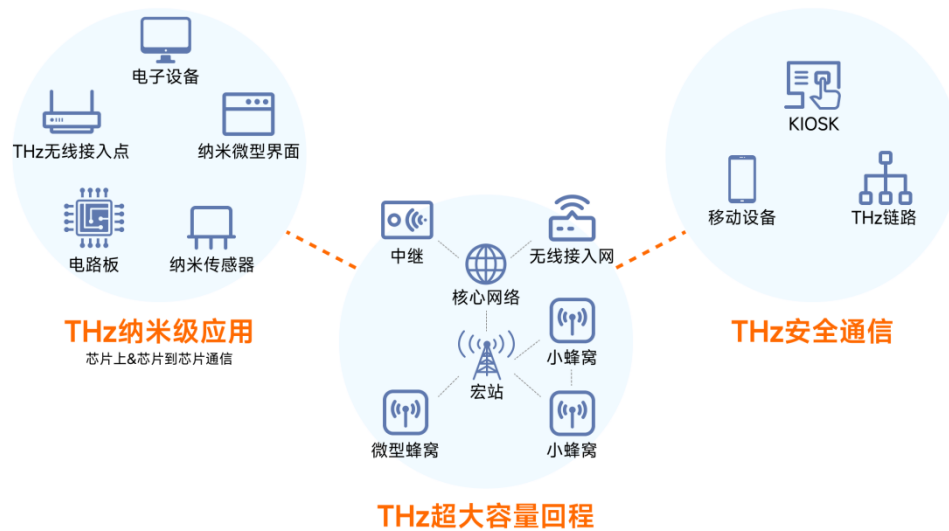


图 3 太赫兹通信应用场景

3.1.2 可见光通信

可见光通信（Visible Light Communication, VLC）是通信频率在 380THz-800THz 之间的无线通信技术，利用荧光灯或二极管发出的高速闪烁信号来传输信息。该频段频谱资源丰富，并且无需授权。组网时可利用现有的基础照明设施，能极大地降低网络部署成本。可见光通信还具有照明、通信、定位等多维功能。在未来，点亮一盏 LED 灯就可以上网，无需 WiFi，因此可见光通信也被称为 LiFi。

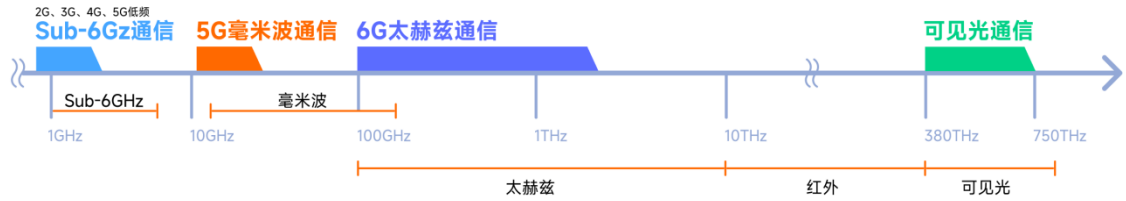


图 4 可见光频谱示意图

可见光通信适合于家庭或办公室场景，被视为新型智慧网络的核心技术。可见光通信技术具有大带宽、高速率、泛在覆盖、绿色节能、精准定位的显著特点，克服了传统无线网络室内深度覆盖成本高、建设复杂等缺点。

在智慧交通领域，车辆的灯光和交通灯可用于可见光通信，能够低延迟、高可靠地传输分散的车辆信息。由于可见光通信只能在可见光区域内访问数据，因此其提供了一种高安全性的传输。

相比于水声通信和水下射频通信，水下可见光通信具有成本低、传输速率高、抗干扰能力强、保密性好等优势。目前，水下可见光通信能够获得 Gbps 的传输速率和十米级的传输距离。

可见光通信还可以用于定位，相比于 Wi-Fi、蓝牙等室内定位技术，VLC 具有更高的定位精度，可应用于机场、车站、大型商场、地下车库、巨型建筑、办公楼宇等室内定位场景。

3.1.3 轨道角动量

轨道角动量（Orbital Angular Momentum，OAM）技术是提高频谱利用率的一项重要技术。区别于传统的无线调制技术，轨道角动量作为一个新的调制维度，利用不同 OAM 模态之间的正交性，可以实现同频、同时传输多流数据，提高频谱效率和传输容量。OAM 波束具有较强的抗干扰能力，具有较好的应用前景。

OAM 可以分为量子态 OAM 和统计态 OAM。从微观角度看，量子态 OAM 波束在电磁波发送时就已经具有 OAM 模态，即每个电子都具有 OAM。量子态 OAM 对硬件要求较高，收发两端均需要专用的量子天线。目前研究较多的是统

计态 OAM。统计态 OAM 是利用特殊天线或阵列天线产生的，通过相邻阵元上的连续相移，使波束具有涡旋形态，通过改变相移的大小来控制 OAM 的模式。利用模式之间的正交性，OAM 可以实现多流数据传输。

可以利用均匀圆阵列（Uniform Circular Array, UCA）产生 OAM 波束。但这种基于 UCA 的 OAM 通信系统要求收发端阵列保持对准，在移动通信中难以满足这一条件。在回传链路（Backhaul）中，收发端相对静止，比较容易实现收发端的对准，能够发挥 OAM 通信系统的高速率传输优势。目前的回传链路大都是基于光纤传输的，成本较高。利用 OAM 通信系统的高频谱效率和高传输容量的特点，可以在无线传输情况下满足回传链路容量需求，有效降低部署成本。

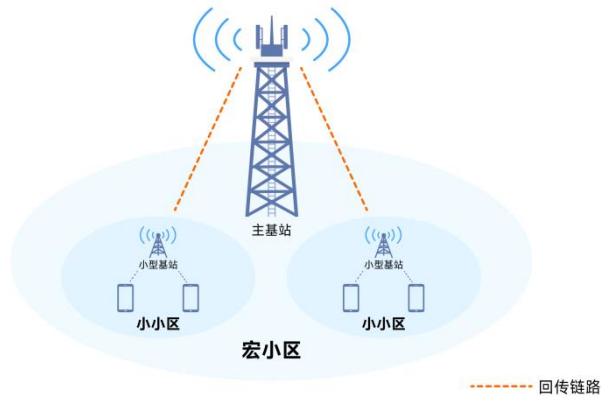


图 5 轨道角动量回传链路场景

随着传输距离的增大，OAM 波束会越来越发散，即 OAM 信号的最佳接收半径会随着传输距离增加而变大。因此，如何较大幅度地抑制甚至消除发散角的影响，解决远场下的 OAM 传输问题是一个需要解决的问题。此外，多径、大气湍流等因素都会影响 OAM 通信系统的传输能力。解决上述问题是 OAM 通信系统获得大规模应用的前提。

3.1.4 智能超表面

可重构智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）是一个跨学科新兴技术，业界也称之为智能超表面、金属超表面（Meta-surface）等。它是一种由许多具有特殊电磁特性的超材料组合在一起的超表面设备，可以帮助 6G 实现低成本的盲区精准动态覆盖。

智能超表面技术通过改变超表面上阵元的反射系数，改变入射电磁波的电磁特性，如振幅、相位、极化等，使得无线传播环境从无法改变的自然传播条件转变为智能可控的传播条件，比如通过控制无线电波的反射、散射和折射达到人为控制无线信道的目的。

在 6G 无线网络中，毫米波甚至太赫兹频段有望得到广泛应用，通信频谱将进一步拓宽。这种高频段无线信号的绕射、散射能力较差，传播距离非常受限，从而造成较多的覆盖空洞。而将 RIS 技术引入到 6G 通信系统，通过 RIS 可控的反射能力，对盲区用户进行覆盖，有望提升高频段的通信质量。此外 RIS 易部署、成本低等特点也可以降低网络的部署成本和能耗。

将智能超表面技术与大规模多输入多输出（Multi-input Multi-output，MIMO）技术相结合是一个重要的应用场景。基于 RIS 的大规模 MIMO 收发机利用了智能超表面的特有属性，使得该系统既不需要额外射频链路，又显著降低了大规模 MIMO 的使用成本。利用智能超表面生成多个波束，以低成本的方式实现大规模 MIMO 的功能。

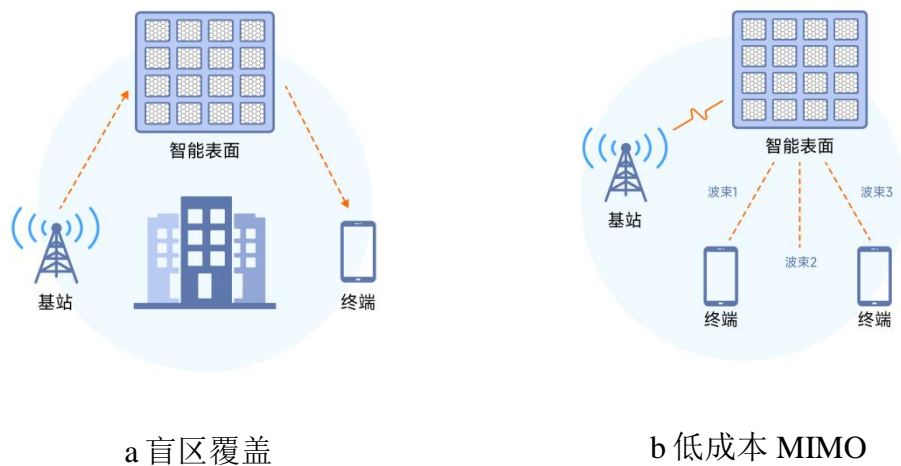


图 6 智能超表面应用场景

3.1.5 超大规模天线阵列

大规模天线阵列技术是 5G 提高频谱效率的关键技术之一，在满足 eMBB、uRLLC 和 mMTC 业务的需求方面发挥了至关重要的作用。6G 将会采用更高的频段，因而天线尺寸可以做得更小。超大规模天线阵列，也叫超维多天线技

术（**x-Dimension MIMO, xD-MIMO**），是大规模天线阵列技术的演进升级，它不仅包含天线规模的进一步增大，还包括新型的系统架构、新型的实现方式、智能化的处理方式等。

超大规模天线阵列可以分为集中式超大规模天线阵列和分布式超大规模天线阵列。目前 5G 网络中部署的大都是集中式大规模天线，在低频段已经达到 192 天线阵子和 64 通道，在高频段有望达到 512 天线阵子。分布式超大规模天线系统将在更大的地域范围内部署大量的分布式射频器件和天线。

分布式大规模天线阵列打破了传统小区的概念，终端在地理空间上被多个天线覆盖包围，即无蜂窝大规模 MIMO。无蜂窝大规模 MIMO 有望消除传统的小区概念，由大量的分布式接入点（**Access Point, AP**）组成，AP 数远大于用户数。这些接入点在相同的时间/频率资源下同时服务于少量用户。借助于分布式超大规模天线技术，6G 网络有望实现极高的速率、无边界的用户体验。

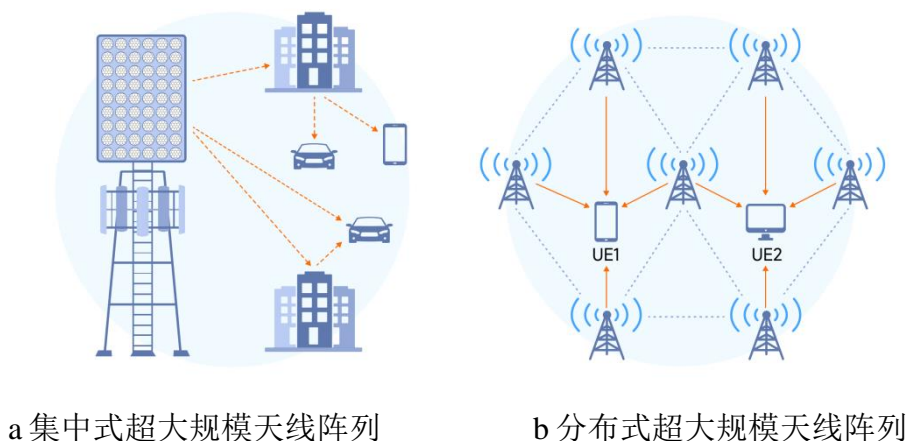


图 7 集中式和分布式大规模天线阵列

超大规模天线阵列技术还可以应用于感知、高精度定位等场景。超大规模天线阵列的大带宽、窄波束特点保证了空间定位的高分辨率，从而可以获得厘米量级的定位精度。

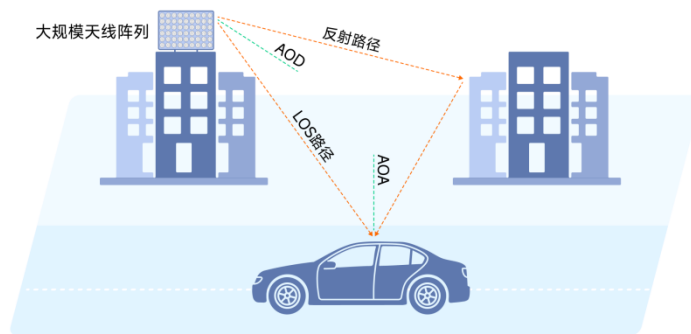


图 8 基于超大规模天线阵列的高精度定位

3.1.6 确定性网络

在未来移动互联网的应用场景中，有相当一部分应用对数据的传输时延、时延抖动等指标要求很高，例如工业互联网、车联网、自动驾驶等。这些业务对时延要求极高，传统“尽力而为”的数据传输方式已经无法满足这类场景的需求。因此，6G 网络需要引入确定性的能力，对传输的时延、时延抖动等传输指标提供确定性保障，以满足上述业务对可靠性和稳定性的极高要求。

确定性网络技术是一种基于 IP 网络的端到端数据流控制技术，能够实现准时、准确、快速的数据传输。

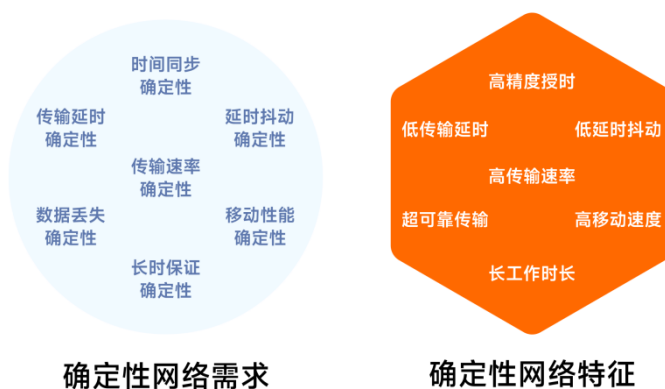


图 9 确定性网络要求

时钟同步技术、零拥塞丢失处理机制、超可靠数据包交付方法等技术可以用来满足确定性网络的确定性要求。

1) 时钟同步技术。为了做到数据传输的确定性，网络设备和终端之间的时

间需要做到精准可控，两者之间使用精确的时间控制协议，从而控制内部同步时钟的精度达到 $1\mu\text{s}$ - 10 ns ，以保证数据传输时刻精准可控。

2) 零拥塞丢失处理机制。拥塞丢失是网络节点中输出缓冲区的统计溢出，是“尽力而为”网络中丢包的主要原因。通过扩大缓冲区间，为临界流分配充足的缓冲区间，可以减少拥塞。再通过调整数据包的传输，达到更加精确的时延确定性。

3) 超可靠的数据包交付方法。网络设备故障是造成丢包率高的另一个重要原因。通过多路径发送数据流的副本，借助于必要的重复发送，可以避免网络中由于单个随机事件或单个设备故障导致数据包的丢失。

确定性网络主要应用场景包括专业的音视频传输、电力公共事业、智慧建筑自动化系统、工业无线等。这些业务大多对网络的可用性和确定性有较高要求。为了满足不同种类的业务的需求，确定性服务质量（Quality of Service, QoS）和尽力而为 QoS 需要在同一个网络中共存，这也是确定性网络价值的重要体现。另外，确定性网络技术的部署还可以和边缘计算技术统筹考虑，进一步提高网络性能。

3.1.7 至简网络

移动通信经历数十年发展，呈现出了多网异构融合的发展趋势。6G 网络有望实现空天地海一体化组网，具备通信和感知一体化的功能。通过多种异构网的深度融合，实现终端设备的统一接入。为了实现高效的多网异构融合，并简化设备的实现，需要对网络架构进行精简设计。

6G 网络将具备至简的特点，要求做到协议栈扁平化，以保证传输简单高效，并实现网络的“即插即用”。6G 网络通过架构至简、协议至简、功能至强，实现高效的数据传输、高鲁棒性的信令控制、按需功能部署，以达到网络的精准服务，从而有效降低网络能耗和规模冗余。至简网络还意味着轻量级的无线网络，即通过统一的信令覆盖，保证可靠的移动性管理和快速的业务接入；通过动态的数据接入加载，降低小区间的干扰和整网能耗；通过基站功能的分阶段和按需加载，提供业务服务的个性化。

为了实现架构至简，6G 网络将基于全 IP 融合的通信协议，做到全局分布

式、局部集中式并举。同时，6G 网络还要做到协议至简，移除和简化冗余的层间协议、对层间映射进行优化以及移除和简化冗余的网络功能。

至简网络，减少了不必要的数据传输路径以及层间处理，提高传输速率、降低传输时延，使数据传输做到精准可控；提高传输效率、降低网络成本，助力 6G 实现碳中和的目标。

3.2 泛在：无所不在、触手可及

3.2.1 通信感知一体化

通信即两个及两个以上节点之间的信息传输。无线感知是借助无线信号对物理环境进行探测，如获取目标的距离、角度、速度等参数。通感一体化，是指将通信和感知两个功能相融合，使得未来的通信系统同时具备通信和感知功能。随着高频段毫米波、太赫兹电磁波的使用，有望使 6G 网络具备高精度的感知、探测、成像能力，实现通信感知一体化。

通感一体化技术，将使 6G 网络具有通信和感知的双重能力。通感一体化的 6G 网络，将为用户提供无所不在的环境感知和数据交互能力，从而实现对物理世界的实时渲染、呈现和动态建模。借助于泛在的感知网络，通信的能力将得到大幅度提升。例如，在无线信道传输信息时，终端通过主动认知并分析信道的特性来感知周围环境的特征，从而实现通信与感知的相互增强。此外通感融合还可以提高终端定位精度。

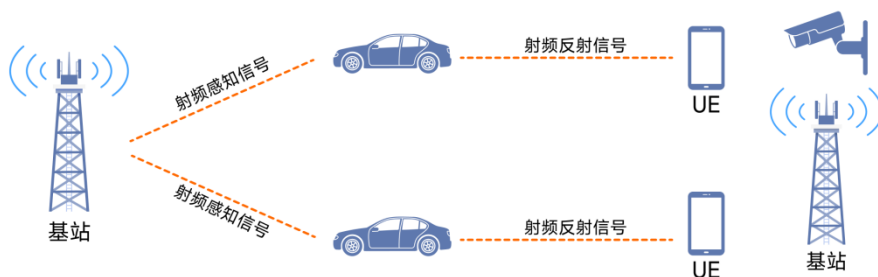


图 10 通感一体化示意图

3.2.2 空天地海一体化

目前的蜂窝网络仅覆盖了地球 30%的陆地面积，对于绝大多数区域，蜂窝网络难以覆盖，例如远洋、沙漠、偏远山区等。未来的 6G 网络不仅要满足城镇、乡村这些有常住人口的区域的覆盖，还需要满足远洋货轮、航空用户的连接。同时，6G 网络还要满足无人区的覆盖，例如无线传感网络（Wireless Sensor Network, WSN），很多用于环境监测、森林防火等业务的 WSN 传感器节点需要部署在偏远山区。此外，海洋占据了地球 70%的面积，海洋资源开发、海洋科学研究、水下通信保障、海洋生物监测等都需要通信保障。因此，未来的 6G 网络将会把网络覆盖拓展到太空、深山、深海、陆地等空间，实现对空天地海全面泛在的立体覆盖。

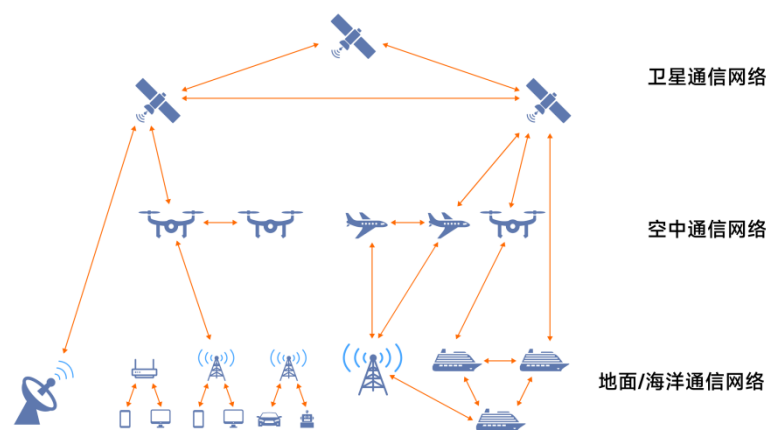


图 11 空天地海通信网络示意图

空天地海一体化网络由不同轨道卫星构成的天基、各种空中飞行器构成的空基、卫星地面站和传统地面网络构成的地基以及海洋通信设备构成的海基四部分组成，具有覆盖广、部署灵活、功耗低、精度高和抗干扰能力强等特点。

未来无论是步行、乘车、坐飞机，还是在人迹罕至的无人区，甚至遇到自然灾害，地面通信设施受损的情况下，用户仍可以随时随地接入 6G 网络，真正实现任何时间、任何地点都可以获得高质量的 6G 服务。实现空天地海一体化组网，需要对网络架构、协议栈、网络运营等方面开展进一步的研究。

3.3 智慧：智慧内生、智慧无界

最近十年，AI/ML 技术，特别是其中的深度学习技术在计算机视觉、自然语言处理、语音识别等多个领域获得了巨大成功。内生 AI/ML 将成为 6G 网络的重要发展方向。通过通信网络与 AI/ML 技术的有机融合，实现智慧内生，大幅度提升 6G 网络的通信能力，并使 6G 具备原生的智慧能力，从而提供更加丰富多样的业务。

3.3.1 基于 AI/ML 的无线通信

最近几年，AI/ML 在无线接入网中的应用获得了广泛关注，并取得了巨大的研究进展。其中的物理层 AI/ML 技术包含两种技术路线：一是基于 AI/ML 技术的端到端通信链路设计，二是基于 AI/ML 技术的通信模块的设计。

基于 AI/ML 技术的端到端通信链路设计，为通信系统端到端高效传输提出了最优智能组合策略，根据用户端到端传输需求，综合考虑各模块多个指标，实现资源配置。克服现有技术单独优化一个模块使得“各个模块的最优不等于全局最优”的不足，根据不同用户的不同需求，实现通信系统全局最优。



图 12 基于 AI/ML 的端到端链路设计

基于 AI/ML 技术的通信模块的设计，使用 AI/ML 算法替代传统的通信模块。比如，把 AI/ML 技术应用到信道估计、信道编译码、信道状态信息（Channel State Information, CSI）反馈等。已有的研究表明，AI/ML 能够显著提升关键性能指标和系统能力。

1) 基于 AI/ML 的信道估计

与传统的信道估计方法相比，基于 AI/ML 的信道估计方法具有明显的优势，特别是在通信系统的天线规模和用户数量增加的情况下。基于 AI/ML 的信道估计，可以视为神经网络对估计得到的信道信息的过滤和去噪，使用卷积神经网络对信道噪声特征进行学习，从而对噪声进行一定的剔除。二维的信道信息矩

阵可以视为对二维的图像像素序列进行分辨率恢复，可以通过卷积网络、残差网络等方法提升信道估计的精度。基于 AI/ML 的信道估计，需要对训练开销、导频开销以及残留的信道估计误差进行权衡处理。

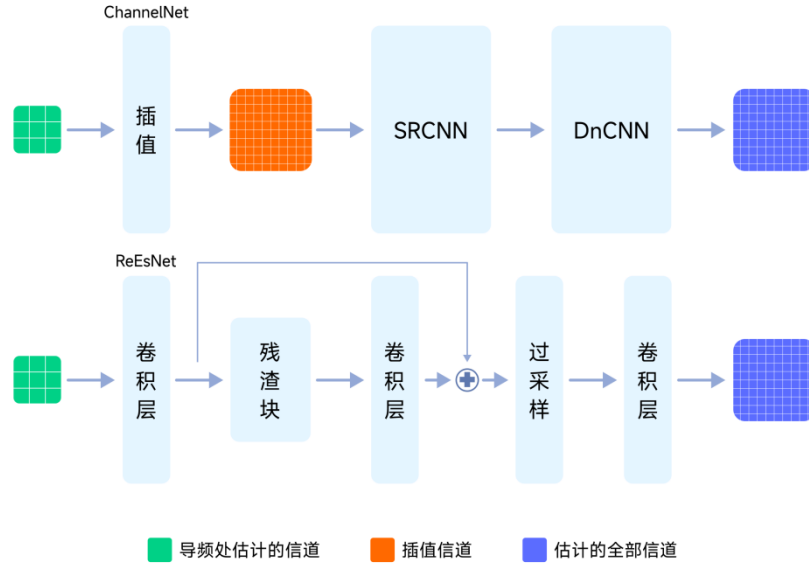


图 13 基于 AI/ML 的信道估计

2) 基于 AI/ML 的 CSI 反馈

无线信道是一个时变信道，并且存在频率选择性和空间选择性。发送端如果能获得 CSI，就可以做一定的自适应处理，比如，自适应编码调制、MIMO 预编码、功率控制等。随着超大规模 MIMO 技术的应用，能否对高维的 CSI 进行有效反馈、对未来时刻的 CSI 进行准确预测，成为能否发挥大规模 MIMO 技术优势的关键，这是一个极具挑战的问题。基于 AI/ML 的 CSI 反馈技术能够以较低的反馈开销获得较高的反馈精度。

基于 AI/ML 的 CSI 反馈，可以视为是对信道信息的压缩编码和译码恢复。在接收端，利用 AI/ML 编码器对信道信息进行特征提取和压缩，把压缩后的信息反馈给发送端。在发送端，利用与之匹配的 AI/ML 译码器，恢复 CSI。基于 AI/ML 的 CSI 反馈，需要解决编码器和译码器的训练问题，并且需要保持收发两端 AI/ML 编译码器的同步。

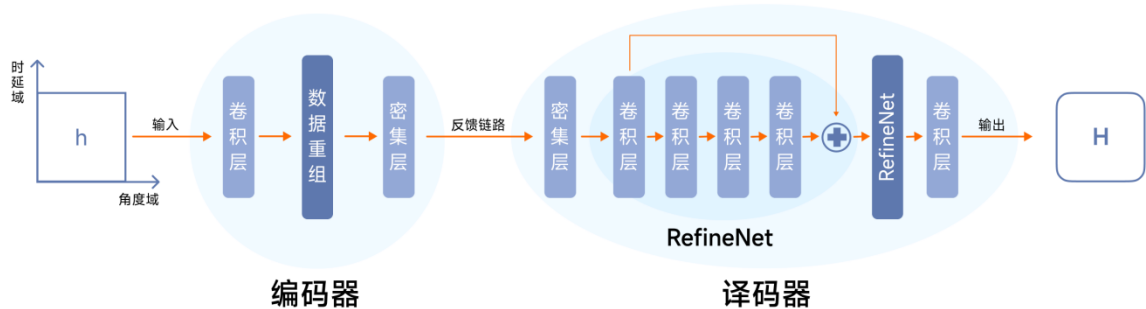


图 14 基于 AI/ML 的 CSI 反馈

3) 基于 AI/ML 的信道编码

神经网络具有强大的非线性映射和分布式处理能力，基于神经网络的 AI/ML 技术可以在编码性能、计算复杂度、功耗和处理延迟等方面提供比传统方法更强大的信道编码解决方案。例如通过 DNN，CNN，RNN 等神经网络进行信道编码。

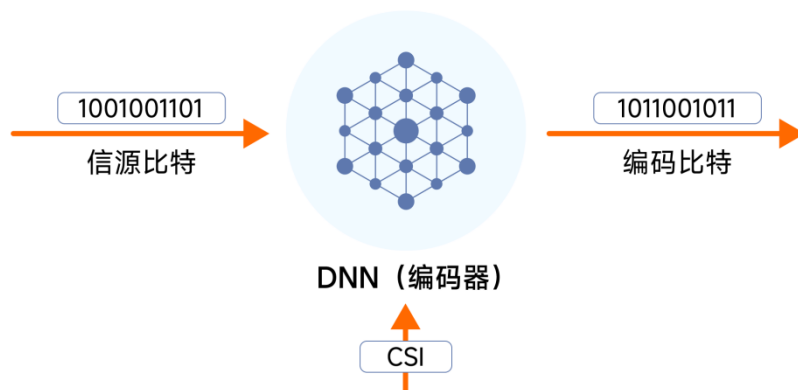


图 15 基于 AI/ML 的信道编码

4) 基于 AI/ML 的信道译码

译码过程存在大量的信息码字，大量的码字有利于训练深度学习网络模型，可以将传统译码方法和 DNN 结合来进行信道译码。将神经网络模型与传统译码器结合，在存在噪声的环境中进行信息比特的估计，深度学习赋能的译码算法不仅在误码率上低于传统译码算法，而且具有更低的复杂度。

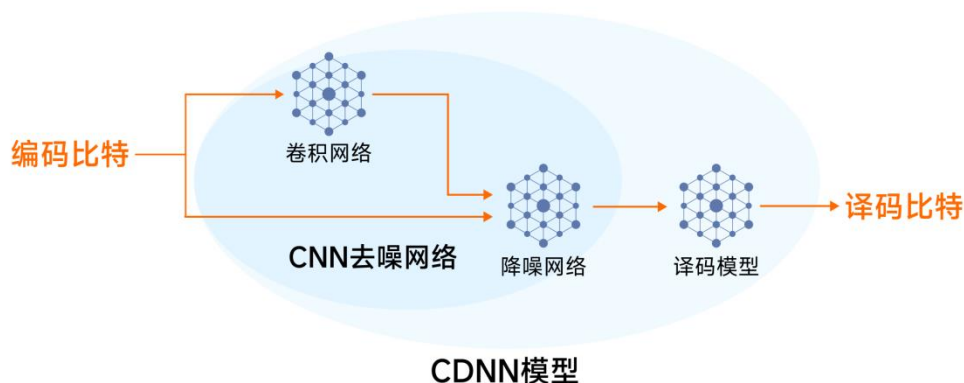


图 16 基于 AI/ML 的信道译码

3.3.2 智能内生网络

AI/ML 技术将内生于未来的移动通信系统，形成内生智能的新型 6G 网络架构。利用新型架构、大数据、云计算等技术，6G 系统将呈现出智联、智通的新特征。充分利用网络节点的交互、运算与认知能力，借助于分布式学习、群智式协作和云边端融合计算，6G 网络将原生支持各种 AI/ML 应用，形成全新的生态体系，实现以用户为中心的服务体验。

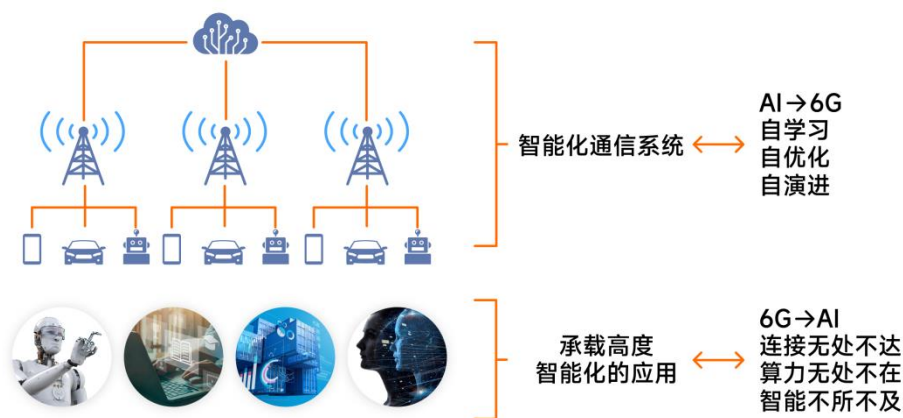


图 17 智能化通信系统承载的智能应用

具备内生智能的 6G 网络，为 AI/ML 业务提供高效的算力服务，从而可以帮助客户更加高效、低成本地完成计算。要支持智能内生的网络，移动基础设施要从单纯提供连接服务发展为同时提供连接服务和计算服务，包括传输、算力、存储等服务。

3.4 随心：按需分配、随心所欲

通过切片技术，5G 网络可以虚拟成多张网络，满足用户对网络资源的个性化需求，但是对单个用户的单个业务而言，用户的个性化服务还是难以满足。此外，当存在多个接入网络时，网间协调困难，网络之间的独立性和封闭性降低了处于多个网络覆盖下的用户的性能。

6G 网络为了更好地满足个性化服务，提出了以用户为中心的网络（User-Centric Network, UCN）这一概念，以用户为中心的网络，顾名思义，就是一个用户可定义、可配置、可控制、可管理的网络系统。通过频段、时间、设备、端口、带宽等各种物理或逻辑网络资源进行虚拟化，将虚拟的网络资源进行更细粒度的切分和聚合，借助相关软件灵活地将网络资源按需分配给不同用户，在满足每个用户个性化需求的同时，保证不同用户间的网络资源相互隔离。用户可以为自己用户域内的所有设备配置终端策略，用户也对相应的流程权限拥有控制权。换言之，用户拥有完全独立的数字空间，这些可以视作用户的个人数字资产。每个用户通过虚拟机或者容器拥有自己的网络资源虚拟实例。网络资源虚拟实例可以分为：网络级业务节点（NSN）、用户业务节点（USN）。

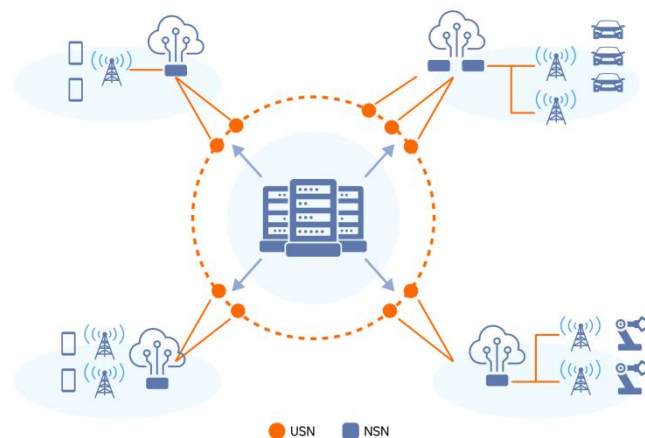


图 18 以用户为中心的网络

4 结束语

移动通信从 1G 到 5G 走过了不平凡的历程，从只支持语音业务的 1G 到支持三大应用场景的 5G，移动通信的发展对人类的生产和生活方式产生了深远的

影响。可以说，移动通信推动了各行各业技术的进步，提高了人类的生产、生活水平，给人类社会带来了翻天覆地的变化。新应用、新场景的出现，比如元宇宙，对未来的 6G 系统提出了更高的需求，包括超高峰值速率、超高定位精度、超低时延抖动、超高连接密度等。作为下一代移动通信系统的 6G，将实现通信、计算和 AI/ML 的深度融合，从而满足更高、更优的性能指标，为新业务、新场景提供满意的服务。可以预见，6G 将会对未来产生颠覆式的影响。

本白皮书分享了小米对 6G 愿景和 6G 潜在关键技术的思考，阐述了 6G 的应用场景和潜在关键技术，展望了 6G 的新特征。小米愿与业界同仁共同推动 6G 的技术创新和产业发展，一起拥抱“极致泛在、智慧随心”的 6G，让全球每一个人都能享受科技带来的美好生活。

参考文献

- [1] 6G 总体愿景和关键潜在技术白皮书, IMT-2030,2021.
- [2] 6G 网络架构愿景与技术展望白皮书, IMT-2030,2021.
- [3] 通信感知一体化技术研究报告, IMT-2030,2021.
- [4] 无线 AI/ML/ML 技术研究报告, IMT-2030, 2021.
- [5] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu and P. Mohapatra, Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015.
- [6] Long W X, Chen R, Moretti M, et al. Joint Spatial Division and Coaxial Multiplexing for Downlink Multi-User OAM Wireless Backhaul[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2021.
- [7] Q. Wu and R. Zhang, Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface aided Wireless Network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020.
- [8] Li L , H Chen, Chang H H , et al. Deep Residual Learning Meets OFDM Channel Estimation[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2019.
- [9] Soltani M , Pourahmadi V , Sheikhzadeh H . Pilot Pattern Design for Deep Learning-Based Channel Estimation in OFDM Systems[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2020.
- [10] H. Cao et al. Resource-Ability Assisted Service Function Chain Embedding and Scheduling for 6G Networks With Virtualization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021.
- [11] W. Saad, M. Bennis and M. Chen. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems[J]. IEEE Network, 2020.
- [12] C. -X. Wang, J. Huang, H. Wang, et al. 6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenge[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020.

- [13] A. Liu et al. A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021.
- [14] S. Wan, J. Hu, C. Chen, et al. Fair-Hierarchical Scheduling for Diversified Services in Space, Air and Ground for 6G-Dense Internet of Things [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021.