

6G 前沿关键技术研究报告



2022

6G前沿关键技术研究报告

IMT-2030 (6G) 推进组 中国通信学会

2022年11月

目录

一、6G 概念	3
二、6G 愿景需求	5
三、6G 无线前沿关键技术	12
1、空口演进技术	12
1.1 超大规模 MIMO	12
1.2 先进调制编码	15
1.3 新波形技术	17
1.4 全双工	18
1.5 新型多址接入	21
2、新型技术	23
2.1 智能超表面	23
2.2 全息无线电	26
2.3 轨道角动量	28
3、跨域融合技术	32
3.1 无线人工智能	32
3.2 通信感知一体化	35
4、新型频谱技术	39
4.1 太赫兹通信	39
4.2 无线光（可见光及红外波段）通信	43
5、信道测量与建模	46
四、总结	49

一、6G 概念

6G 是新一代智能化综合性数字信息基础设施，将实现通信感知计算一体化、空天地海立体覆盖、普惠智能内生安全等能力跃升，具备泛在互联、普惠智能、多维感知、全域覆盖、绿色低碳、安全可信等典型特征，将实现从服务于人、人与物到支撑智能体的高效联接的跃迁，全面引领经济社会数字化智能化绿色化转型。

在技术发展上，6G 将与先进计算、大数据、人工智能、区块链等信息技术交叉融合，实现通信与感知、计算、控制的深度耦合，并充分利用低中高全频谱资源，实现空天地一体化的全球无缝覆盖，随时随地满足安全可靠的“人机物”无限连接需求。**在网络能力上**，6G 不仅可以大幅提升传输速率、时延、连接数密度、频谱效率等网络基础能力，还将具备智慧内生、多维感知、数字孪生、安全内生等新功能。

在业务应用上，6G 将提供完全沉浸式交互场景，支持精确的空间互动，满足人类在多重感官、甚至情感和意识层面的联通交互，通信感知和普惠智能不仅提升传统通信能力，也将助力实现真实环境中物理实体的数字化和智能化，构建虚实融合的数字孪生全新时代。

与 5G 相比，6G 将具备一些典型特征。**一是泛在互联**，6G 作为新一代数字信息基础设施，将成为连接物理世界和数字世界的桥梁，在 5G 基础上，进一步拓展物联网的应用领域和范畴，满足从人的连接、到物的连接、再到智能体的随时随地按需接入网络的需求。**二是普惠智能**，未来的人类社会将迈入智能化时代，智能化设备将广泛部

署，一方面 6G 利用低时延、高可靠、大速率传输能力，将成为支撑智能体高效联接的桥梁，将原本单个智能体组合成智能设备群，利用群体决策实现“泛在智慧”，另一方面，6G 网络本身也将非常智能，利用人工智能技术，不仅可以实现网络的自优化、自维护、自演进，还可以根据所感知的周围环境，智能控制编解码、信号处理及通信架构等，进一步提升网络效率。

三是多维感知，感知能力将是 6G 所要具备的新的能力，用于通信的电磁波也将被赋予感知的要求，通过对周边环境的感知，一方面可以用于辅助通信，利用对周边环境的感知信息，帮助实现更高的通信效率，另一方面，广泛部署的基站、终端设备将构建起一个巨大的感知网络，为未来真实物理世界向虚拟数字世界的映射搭建起桥梁。

四是全域覆盖，当前以 5G 为代表地面蜂窝移动通信网络仅覆盖了约 20% 的陆地面积，6% 的地球表面积，6G 将通过与卫星、无人机等非地面通信网络相结合，实现空天地海无缝立体覆盖。

五是绿色低碳，面向 2030 年商用的 6G 将在助力我国“双碳”目标实现方面发挥关键作用，一方面，要在大容量和减碳之间找到平衡点，多维度推动 6G 节能降耗，打造绿色低碳的 6G 网络。另一方面，要通过 6G 赋能千行百业，推动各行业数字化绿色转型，实现绿色低碳发展。

六是安全可信，6G 将彻底改变传统的“外挂式”“补丁式”网络安全防护机制，通过对 6G 网络安全架构进行重新设计，将安全流程内嵌在通信网络架构中，实现内生安全，有效解决未来 6G 网络所面临的各种安全问题。

最终，6G 将实现物理世界人与人、人与物、物与物的高效智能互联，打造泛在精细、实时可信、有机整合的数字世界，实时精确地反映和预测物理世界的真实状态，助力人类走进虚拟与现实深度融合的全新时代，最终实现“万物智联、数字孪生”的美好愿景。

二、6G 愿景需求

（一）6G 发展驱动力

一是经济可持续发展驱动力。首先，新一轮科技革命和产业变革加速推进，驱使经济社会生产方式、核心要素和产业形态发生深刻变化，数字化发展成为世界经济的重要议题和增长引擎。产业数字化将推动生产方式向更高质量、更加智能方向转变，需要以 6G 移动通信技术为代表的新型数字技术为全球经济发展注入新动能。其次，随着人民收入和生活水平的提高，全息视频、3D 视频、感官互联等更高品质服务将加速普及，极大地满足人们个性化、高端化的生活需求，这对移动通信技术性能提出了更高要求。最后，经济全球化已成为经济发展的助推器，全球性的分工协调带来更低的成本和更高的效率。未来 6G 移动通信技术将配合数字孪生、全息感知、沉浸式交互等多类数字技术，进一步降低人与人、人与机、人与物之间的沟通成本，助力国际分工更加协调有效、产业分布更加合理、生产效率进一步提高。

二是社会可持续发展驱动力。首先，未来社会治理主体将进一步多元化，治理架构和治理过程将更加扁平化，社会管理服务体系也将

呈现全要素网格化发展态势，需要 6G 技术配合其他数字技术共同作用，对科学精准的决策制定和动态实时的事件响应提供有效支撑。其次，当前全球正面临人口老龄化、少子化等严峻挑战，新兴经济体在享受人口红利后，逐渐深陷人口数量放缓和经济稳定增长之间的矛盾，世界贫富差距不断拉大，6G 技术将极大提升公共服务的用户体验，增强公共服务能力，成为有效应对收入失衡挑战、助力各群体协同发展、全面提升人类福祉的强大数字工具。

三是环境可持续发展驱动力。首先，降低碳排放、推动碳中和要求提升能效、实现绿色发展。我国“双碳”目标的提出将加速推动移动通信产业的节能和绿色化改造。同时，高耗能行业的绿色低碳转型也亟需 6G 提供更加精准、高效的数字化管理能力。其次，极端天气、疫情等重大事件驱动建立更加广泛的感知能力和更加密切的智能协同能力。“绿天鹅”事件等全球极端气候变化等要求移动通信网络实现环境生态预防、监测、保护、救援等管理闭环。全球蔓延的疫情等重大突发性事件亟需 6G 为代表的移动通信技术以更加普惠智能、高效的跨区域协同方式，实现社会资源的密切协同和灵活调度，助力更大范围的密集性动员。

四是技术创新发展驱动力。首先，移动通信技术的创新突破将驱动着 6G 总体性能不断提升，超高速率信道编码调制、非正交多址接入、超大规模天线、太赫兹通信等技术的应用，将推动空口接入能力的量级提升，通信技术与人工智能、大数据、先进计算等技术的横向

融合，孕育出信息、通信、数据等 ICT 融合新领域，促进网络向开放化、智能化、定制化发展。其次，通信新材料突破将助力 6G 实现变革性发展。例如，信息功能材料能加速新一代移动通信系统所需的存储器、光等信息材料进步；碳纳米管材料可制作比硅基芯片体积更小、热导率更高、能耗更低的芯片；石墨烯技术能以更低成本制造太赫兹等更高频段的新型光学器件等。

（二）6G 典型场景

增强型移动宽带、超可靠和低延迟通信、大规模机器类型通信是 5G 的三大典型场景，IMT-2030 (6G) 推进组认为，面向 2030 年及未来的 6G 将在三大典型场景基础上不断扩展。6G 不仅将提供以人为中心的沉浸式交互体验和高效可靠的物联网场景，服务范围也将扩展至全球立体覆盖。此外，6G 还将超越传统通信的能力边界，扩展感知服务和智能化服务的新场景。

一是超级无线宽带。超级无线宽带是增强型移动宽带（enhance Mobile Broadband, eMBB）的演进和扩展，不仅将极大提升以人为中心的沉浸式通信体验，也将在全球任意地点实现无缝覆盖。超级无线宽带场景将广泛应用于生活、生产、工作、教育、娱乐等多个领域，提升人们的生活质量和工作效率。在热点部署的场景下，以人为中心的通信（例如，沉浸式 XR、通感互连、全息通信等）和以机器为中心的通信（例如，视频监控控制、工业机器人触觉反馈等）均对峰值速率、用户体验速率、系统容量、频谱效率提出更高的要求。此外，6G

网络还需要提供低时延和高稳定性以保障用户体验。全域覆盖将支持全时全地域的无线宽带接入，在空天地一体化的三维立体网络中提供无缝切换、高移动性和高质量用户体验。

二是极其可靠通信。极其可靠通信将在低时延高可靠通信(Ultra Reliable Low Latency Communication, URLLC)的基础上进一步增强能力。典型应用包括智能化工业领域的机器人协作、无人机群和各种人机实时交互操作，智能交通系统中的全功能自动驾驶，精准医疗中的个性化“数字人”及远程医疗手术，以及智慧能源、智能家居领域的应用等。除更低时延和更高可靠性要求外，机器协同交互类应用对抖动、时间同步、稳定性等确定性指标也提出了极高需求，同时需要具备中高速数据传输和超高精度定位的能力。为此，6G网络设计需要考虑多维度性能需求。

三是超大规模连接。超大规模连接将在5G大规模机器类型通信的基础上，拓展全新的应用领域和能力边界。超大规模连接的对象将包括部署在智慧城市、智慧生活、智慧交通、智慧农业、智能制造等场景的各类设备，典型应用包括远程抄表、环境监测、智能灯杆互连等。此外，未来数字孪生世界将通过部署大量传感器，实现对日常生活中各类设备的数据采集及传输，并通过建模、推演、决策等环节与物理世界交互。超大规模连接的场景特点是连网设备数量巨大，但其中大部分可能仅产生零星散发的流量。与5G中仅支持大规模设备的低速率传输相比，6G超大规模连接设备的传输速率将从低到高不等。

数据包的传递频次根据具体应用也存在较大差异，例如从一天一次到几毫秒一次不等。此外，具备不同采集能力的传感器其寿命也存在较大差异。这一场景在某些用例下也需要支持高精度定位、高可靠性和低时延能力。

四是通信感知融合。通信感知融合是 6G 新增典型场景，感知和通信的集成将提供高精度定位、环境重构、成像、等多元化能力，极大促进超高分辨率和精度的应用需求，如超高精度定位、高分辨率实时无线地图构建、基于设备甚至无设备的被动目标定位、环境重建和监控、手势和动作识别、产品缺陷监控、访客识别等。此外，通信感知融合也将有助于提高通信的性能和效率，例如，通过考虑用户移动轨迹和环境变化来优化无线资源利用率。通信感知融合可以广泛应用于很多领域，为车联网、智能工厂等提供更好的服务。这一场景增加了新的性能维度要求，例如对距离、速度、角度的感知分辨率、感知精度、检测概率等，其指标需求因应用而异。对于定位和环境重构等功能，需要超高精度和分辨率；对于成像功能，超高分辨率是关键；对于手势和活动识别，检测概率是首要考虑因素。

五是普惠智能服务。普惠智能服务是 6G 的新增典型场景，依托网络对需要进行高效分布式智能学习或推理的智能化服务提供集成化的通信和 AI 算力。它不仅服务于特定应用服务，还将服务于未来整个通信系统，提高网络整体的性能和效率。在这个典型场景中，网络中的大量智能体将联合执行复杂的 AI 训练和推理任务，从而充分

利用移动边缘侧（包括设备中）的智能算力，使快捷和灵活的智能服务覆盖社会各领域。该场景的典型应用包括数字孪生数据训练和推理过程中的图像识别、生成和预测，执行复杂任务的机器人协作，以及智能交互中人类和机器之间知识传递和技能模式学习。普惠智能服务以提供 AI 学习和推理为目标，除了通信所需的大容量和低时延要求外，该场景还需要一组与 AI 计算性能直接相关的能力指标，如收敛时间、联合通信和计算的能效、训练效率和准确性、推理效率和准确性等。此外，实现原生可信的网络安全和数据隐私保护也是该场景的重要目标与关键基础条件。

（三）6G 关键能力

6G 关键能力指标可以分为性能指标和效率指标。性能指标体现为从用户需求的角度出发，需要未来 6G 提供的关键性能水平。效率指标则主要从网络运营和可持续发展需求的角度出发，提出未来 6G 系统需达到的效能指标。

一是关键性能指标。6G 将渗透于以人为中心的数字生活，包含办公、消费、出行等各种区域，以物为中心的数字化城市和生产，包含交通、医疗、工业、远程监测等行业应用领域，及消除数字鸿沟的普遍覆盖。以室内热点、智慧城市、工厂产线、工业制造区、医院、街道、偏远区域为代表的 6G 典型场景，分别具有高流量、高密度、高移动、高精度、高智能、广覆盖等特征，将对 6G 网络设计和部署形成挑战。综合考虑 6G 典型业务特点、部署场景特征、用户和业务分

布等特点，获得典型部署场景下的 6G 关键性能需求，主要包含体验速率、峰值速率、流量密度，时延、同步和抖动，连接数密度、移动性、可靠性、覆盖、感知/定位精度，AI 服务精度等。未来 6G 网络需要具备比 5G 更高的性能，支持 Gbps 至几十 Gbps 的用户体验速率，每平方公里千万至上亿的连接数密度，毫秒甚至亚毫秒级的空口时延，每平方米 0.1 至数十 Gbps 的流量密度，每小时 1000Km 以上的移动性，数百乃至 Tbps 的峰值速率。以上指标在原有 5G 的基础上将实现 10 至 100 倍的提升。此外，6G 还进一步扩展了新的能力范畴，将需要支持 us 级的抖动，覆盖范围也扩展至空天地海的全球覆盖，厘米级的感知和定位精度，人工智能的服务精度和效率也将达到 90% 以上。

二是关键效率指标。6G 需要大幅提高网络部署和运营的效率，支撑可持续性发展。推动绿色低碳转型是全球共同目标，也是 ICT 产业可持续发展的必然趋势。6G 将以绿色低碳作为网络设计的基本准则，既降低 6G 自身能耗，同时赋能行业低碳发展。为此，6G 将在系统设计、技术创新、产品设计、网络运维等多个环节融入节能减排理念，助力绿色可持续发展。结合网络能耗支出和 ICT 技术赋能减排等因素，预计 2040 年 6G 网络的能量效率相比 2022 年移动通信网络提升约 20 倍。与此同时，信息技术的跨界融合和服务场景多样化对网络可信提出新的挑战，需要从设计初始就构建一张能够满足安全泛在、持久隐私保护、智能韧性的可信网络。可信涵盖了网络安全 (Security)、隐私 (Privacy)、韧性 (Resilience)、功能安全 (Safety)、

可靠性 (Reliability) 等多个方面。可信内生即与生俱来的可信，其可信特征与网络、业务同步产生、发展和量身定制，实现 6G 网络的自我免疫、主动防御、安全自治、动态演进等能力，有效满足不同业务场景的差异化安全需求。6G 研发的过程中还需要考虑网络的运营成本和维护成本，把低成本也作为核心设计目标之一，构建低成本的柔性、至简、孪生自治网络。综合考虑网络性能和潜在频谱，相比 5G，预计 6G 频谱效率将提升 1.5 至 3 倍。

三、6G 无线前沿关键技术

1、空口演进技术

1.1 超大规模 MIMO

经过十余年的发展，大规模 MIMO 技术在理论研究和系统设计方面都有了显著的成果，并已在 5G 新空口中标准化，开始大规模商用。6G 系统在频谱效率、峰值速率等方面的要求更高，超大规模 MIMO 技术是大规模 MIMO 技术的进一步演进升级，通过部署超大规模的天线阵列（低频可以达到或接近 1024，高频可以达到或接近 8192），应用新材料，引入新工具，可以获得更高的频谱效率、更大更灵活的网络覆盖，更高的定位精度和能量效率。

超大规模 MIMO 主要有两种构造方式：集中式和分布式。集中式超大规模 MIMO 主要通过引入新材料新工艺，如平面反射或透射阵列

等技术，构造具有上千单元规模的集中式天线阵列来满足超远距离覆盖、超高频谱效率的需求。分布式超大规模 MIMO 结合了大规模 MIMO 和分布式 MIMO 的技术优势，可显著提升系统频谱效率，改善边缘覆盖。超大规模 MIMO 在提高定位精度以及支持垂直立体覆盖等场景也将发挥着重要作用。分布式和集中式超大规模 MIMO 的关键技术主要包括球面和非平稳信道建模、高精度信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测等。深度学习技术在超大规模 MIMO 技术中的波束管理、信道压缩和反馈和链路自适应等方面目前也展现出了应用潜力。

但超大规模天线阵列的应用也面临着诸多挑战。一方面，随着天线规模的增加，成本、功耗、体积和重量将不可避免的提升，不利于我国“双碳”目标的实现，如不能有效控制超大规模 MIMO 的能耗、成本，其应用和部署将受到限制。同时，集中式超大规模 MIMO 的高精度信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测等关键过程的开销和复杂度都和天线规模成正比，超大的天线规模导致网络和终端在实际实现时都面临挑战。而实现分布式超大规模 MIMO 要将数据和信道状态信息在参与传输的站点之间进行实时的交互，要求站点之间具有高速连接，且具有很高的时频同步精度。另一方面，如果采用新型的阵列结构，传统的实现多路空间复用的传输方案以及波束管理方案等不能直接应用，需要重新研究和设计。虽然深度学习技术对解决超大规模 MIMO 面临的部分技术挑战展现了潜力，但是其稳定性和泛化性是其自身面临的挑战。通信网络对可靠性的要求极高，深度学习

模型如果在运行过程中的数据分布和训练的数据分布不同，模型可能会失效，导致通信链路的中断。

后续将从以下几个方向开展研究：

- 在研究扩大阵列规模对通信系统指标影响的基础上，进一步研究低功耗、高能量效率、更高频段的新型天线架构实现方案，及与天线架构匹配的传输方案。

- 建立性能和复杂度有效折中的，匹配非平稳和近场特性的通用信道模型，并在建模中考虑天线单元之间的耦合情况。探索低开销、低复杂度的信道状态信息获取、波束管理、预处理和接收检测算法。

- 研究低成本分布式超大规模 MIMO 部署方案，研究先进的有线回程或者无线回程技术，研究通过空口实现的通道校准技术以及站点间时频同步技术。

- 智能化超大规模 MIMO 研究，探索适用于无线网络的深度学习模型，研究泛化能力提升技术，提升模型在不同场景中的泛化性能。

- 研究低功耗超大规模 MIMO 技术，从硬件工艺设计、系统设计和网络管理等多个维度研究降低超大规模 MIMO 功耗的技术方案。

技术研判：超大规模 MIMO 可有效提升系统频谱效率、能量效率和覆盖等指标，支撑实现超级无线宽带和通信感知融合等 6G 典型场景，分布式超大规模 MIMO 有望在 6G 得到规模应用，超大规模 MIMO 与人工智能结合已成为业界共识，有必要探索适配低频到太赫兹的多频段多天线技术框架，分阶段逐步开展标准化工作。但超大规模 MIMO 仍然存在成本、功耗、体积和复杂度等问题。

1.2 先进调制编码

先进调制编码技术作为最底层的物理层技术，对 6G 各项性能指标的达成起到重要的支撑作用。考虑到 6G 应用场景更加多样化，性能指标更为多元化，为满足相应场景对吞吐量/功耗/时延/性能的需求，我们需要对空口物理层基础技术进行针对性的设计。

(1) 编码技术

目前业界普遍认为，6G 峰值吞吐率会达到 Tbps 量级。从速率指标来看，目前 5G 的数据信道编码（LDPC 码）设计难以满足如此高的峰值吞吐率要求，需要研究如何在中高码率实现该 KPI。从其他指标来看，6G 还要满足超低功耗和高数据速率场景的极低时延要求，这除了对信道编码译码器提出更高要求外，如更高的能量效率和面积效率，还需要进一步降低译码的 error floor 来提高单次传输的可靠性。6G 极高的峰值吞吐率与极低时延也将对数据存储、译码器处理主频提出更高要求，必然会带来终端或者基站功耗的大幅提升，需要研究低功耗译码技术。此外，从应用场景来看，6G 系统应用场景更加宽泛，例如陆海空天一体化通信将对信道编码提出新的挑战，为满足卫星通信要求需要设计性能更好、可靠性更高的纠错编码和降低 HARQ 重传的编码调制方案。

在编码领域，国际上在极化码、LDPC 码、代数码、卷积码、中短码长译码算法的改进，各种级联码设计，有限长编码性能，AI 与信道编码结合等领域有大量的研究，成果涉及 5G NR 编码的低复杂度译码

演进，基于 5G NR 编码方案的码构造演进、多层编码、编码与 NOMA 和 MIMO 的结合、基于 AI 的信道编码构造方法、Tbps 量级超高吞吐编译码技术、理论基线极限等。

极化码在非常宽的码长/码率下都表现出均衡且优异的性能，如构造得当，其在 1 比特细颗粒度下性能稳定可靠。同时，受益于 SC 译码算法复杂度极低，在支持高吞吐率编译码时，Polar 码在功耗、芯片面积等方面有显著优势。准循环 LDPC 码具有很高的并行性，可支持灵活的码长和码率，非常适合中高吞吐率业务。通过优化准循环 LDPC 码的奇偶校验矩阵，可以进一步提升译码可靠性，降低 error floor，满足 6G 数据信道需求。

（2）调制技术

在调制领域，国际上的研究主要聚焦在 QAM 调制星座的概率整形和几何整形、APSK 调制、调制和编码的联合优化等领域。

通过更高的 QAM 星座图所能获得的边际收益逐渐消失，6G 需要重新审视调制技术。概率幅度整形（PAS）可以生成接近达到香农极限所需的最优分布；几何整形（GS）基于格雷映射的规则幅度相移键控（GRAPSK）技术，可以较好地平衡成形增益与解调复杂度之间的关系，两者都能够获得优于普通 QAM 调制的整形增益。

技术研判：为了达到 6G 的 Tbps 量级的峰值吞吐率，需要使用更高效译码算法和高阶的星座调制。概率成形和几何成形都有一定的增益，但在实现复杂度方面有差异，还需要进一步从频谱效率，能效率，硬件一致性，鲁棒性等方面进行全面的评估。面向 6G，编码技术

有很大可能还将沿着 LDPC 码和极化码的方向进行演进和优化。当然，综合考虑 6G 典型场景和指标体系的多样化，探讨用统一的框架，实现控制信道和业务信道编码的统一，也是有意义的探索。

1.3 新波形技术

变换域波形将发送符号映射于不同于普通时频域的特殊对偶域（如时延-频率、时变-多普勒等对偶域），可以更直观地刻画时延、多普勒等维度的信息。在高速移动等场景下，变换域波形方案相比于传统基于 OFDM 的波形方案（包含 DFT-s-OFDM）在 MIMO 兼容性、复杂度、PAPR、带外泄露、相噪抑制、定时误差鲁棒性等方面需要深入研究。

超奈奎斯特系统包括 FTN、SEFFM 和 OVXDM 等，相比于传统的奈奎斯特采样系统，其突出的技术优势是在非 sinc 脉冲成形下的高频谱效率和高吞吐量。对于有限星座和非 sinc 脉冲成形，超奈奎斯特系统有可能是实现通信容量上界的唯一路径。传统的正交传输信号无法利用滚降部分的频谱，从而带来信息速率的损失，调制阶数越高，损失越大。超奈奎斯特系统在衰落信道下的性能分析和参考信号设计、信道估计，与多天线和大带宽等现有技术的结合，非 sinc 脉冲成形的应用场景等是需要解决的问题，并需要和现有通信系统中可动态调整 MCS 的方案进行对比。

在波形领域，国际上提出了 OTFS，超奈奎斯特等新的波形，国内也在该领域进行了不少的研究，但能否在 6G 标准化中取得突破还有

待各方的共识。

未来 6G 将包含比 5G 更多和更复杂的应用场景，不同应用场景的需求各不相同。例如高频通信中的低 PAPR、相噪鲁棒等需求；高速场景中抵抗多普勒带来失真的需求。多种波形类型的组合方案设计将可以潜在地满足 6G 不同场景的需求，但是多种波形类型组合方案中，不同波形之间的灵活切换、配合及兼容性问题需要深入研究。

技术研判：更高频段、高速移动场景、天地一体化，以及通信感知融合典型场景等 6G 新特征，引发新波形探索。新波形引入需要重点探索与 OFDM 波形之间的灵活切换、配合及兼容性问题，兼顾辅助信号、上行下行侧行链路设计的需求。

1.4 全双工

无线通信业务量需求激增与频谱资源紧缺的外在矛盾，持续驱动无线通信标准的内在变革。提升 FDD 与 TDD 的频谱效率，并消除其对频谱资源利用方式的差异性，成为 B5G 和 6G 通信革新中的一个目标。基于自干扰抑制理论和技术的同时同频全双工成为实现这一目标的解决方案之一，它从理论极限上可提升一倍的频谱效率。

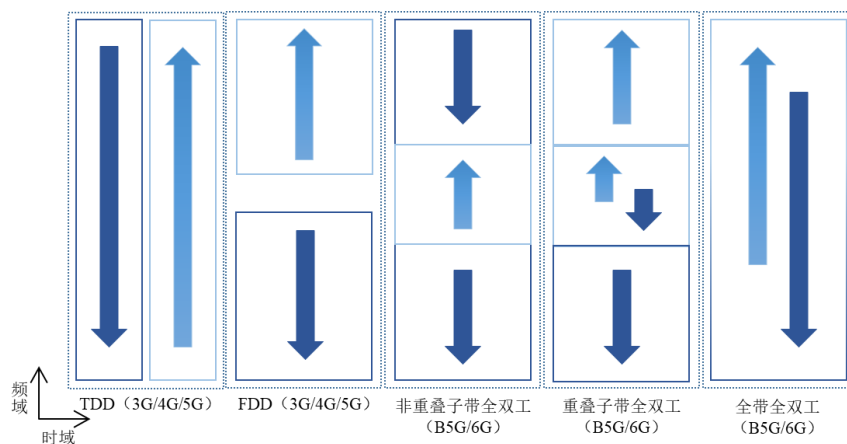


图 1 新型双工方式

图 1 示意了 3 种新型双工方式与传统 TDD/FDD 的差别。非重叠子带全双工是指在一个载波带宽内允许在不重叠的频率子带资源上进行同时上行和下行的收发或发收；而重叠子带全双工是指一个载波带宽内在某相同的频率子带资源同时上行和下行的收发或发收。全带全双工则为在同一个载波的整带宽资源上都允许同时同频的上行和下行的收发或发收。目前子带全双工已纳入 5G R18 研究内容，期待其后续纳入标准和产业成熟。

目前，点对点全双工通信理论相对成熟，sub 6G 和毫米波频段小功率阵元自干扰抑制技术研究较多，全双工高隔离度天线的研究热度增加，大功率大带宽自干扰抑制技术有待深入研究；组网方面，多站组网面临基站间交叉干扰和边缘用户互干扰的难题；自干扰抑制芯片化方面，以美国哥伦比亚大学等高校、KUMU 和 GenXComm 等公司为代表的研究团队推出了相关芯片与产品，国内在芯片、器件方面的技术研究刚起步，尚无全双工相关产品发布。

总的来看，全双工最大限度的提升了网络和设备收发设计的自由

度，可消除 FDD 和 TDD 差异性，具备潜在的网络频谱效率提升能力，它可应用于多种场景，但复杂度和应用条件不尽相同，相关芯片产业还不够成熟，需要分阶段推进。同时，在全双工技术的实用化进程中，尚需解决的问题和技术挑战，包括：大功率大带宽动态自干扰信号的抑制，多天线射频域自干扰抑制电路的小型化，全双工体制下的网络新架构与干扰管理机制，与 FDD/TDD 半双工体制的共存和演进策略。

同时同频全双工体制涉及的通信理论与工程技术研究目前已全面展开，形成了空域、射频域、数字域联合的自干扰抑制技术路线。基于自干扰抑制理论和技术的同时同频全双工从理论极限上可提升一倍的频谱效率。业界对应用场景、全双工组网、自干扰抑制、无线资源管理等关键技术方向进行了研究、评估和硬件验证，目前能够实现 122dB 以上的自干扰抑制能力，正在努力尝试从点对点全双工通信向多站多用户现实网络环境拓展。

面向未来全双工技术产业发展，提出如下发展建议。

- 开展低频段多天线、毫米波阵列天线、大功率大带宽自干扰抑制、通感一体化全双工技术的研究工作，突破工程应用的关键技术；
- 积极探索全双工组网面临的交叉链路干扰抑制技术研究和全双工的潜在应用场景；
- 射频干扰抑制芯片、真时延器、数字自干扰抑制芯片，是全双工技术发展的重要方向，相比于国外，国内还有一定差距；
- 搭建实验验证平台，评估新型双工体制工程化落地的可行性。

技术研判：子带全双工已进入 5G-A 标准化进程，全带全双工在物理层自干扰信号抑制技术方面有一定发展，但其真正应用，仍需以干扰抑制芯片为代表的硬件器件发展作为商业应用的重要支撑，并且在多站多用户组网场景研究方面获得突破。

1.5 新型多址接入

移动通信从第一代（1G）到第四代（4G）基本上采用的都是正交多址，即不同用户占用相互正交的频域、时域或码域资源。由于用户之间的干扰较低，正交多址实现起来比较简单，尤其是接收侧的信号处理。但对于多用户系统，正交多址的性能潜力与系统的容量界仍有很大差距。新型多址，即非正交多址，能够有效地支持多个用户同时同频同空域的传输，以提高系统吞吐和终端连接数。理论上可以证明，非正交多址能够达到多用户系统容量界。新型多址还包含随机接入，既可以工作在调度系统，还可以工作在免调度的无用户标识场景。

自 2018 年以来，学术界在巨址海量接入方面取得了一些突破性的进展，针对有限码块长度，从信息论的角度推导出一系列的海量接入容量界，显示出相比正交多址具有巨大的性能优势。适用于多址接入的多用户系统的信道编码成为研究热点，并结合适合海量接入的压缩感知对用户进行激活检测，对无线传输信道进行估计。在学术界，基于调度的多址叠加传输也有不少论文发表，例如速率分割的多址技术（RSMA），但尚未成为业界共识。目前中国的一些高校在非协作海量多址的容量界分析、多用户编码、激活用户检测的研究水平与国外

高校的著名团队基本相当。中国的一些企业在 6G 新型多址接入的场景需求、方案设计、性能仿真和实验条件等方面有深厚的技术积累。

多址接入是每一代移动通信系统的基本功能，不可能再引入 5G-Advanced 标准中，但有望在 6G 新空口的标准化中（大约是 2025 年左右）开展研究。新型多址接入目前存在的挑战主要包括：

- 场景需求尚未转化成为方案评估的具体指标，例如海量连接数、业务模型、码块大小、空口传输时延等，需要尽快对应空口仿真评估的性能指标；

- 巨址海量接入涉及多项物理层基础技术，如多用户信道编码、信号序列、激活检测等，研究和设计难度很高，需要与新型调制编码领域相结合，尤其对于中短码长的多用户系统，性能优化与场景关系很大，性能最优和系统设计复杂度之间的折衷比单用户系统的更为重要；

- 接收机需要大量的优化设计，以便在性能和算法复杂度之间达到最佳的折衷，以利于在实际系统中应用；

- 基于调度的多用户多点传输（超过两用户两点）的理论容量界仍然一个开放性问题。

技术研判：基于非正交多址的巨址海量接入有望大幅提升终端连接数密度，有力支持 6G 网络的低功耗、超大规模连接场景，将作为物理层基础技术在 6G 新空口中开展研究。

2、新型技术

2.1 智能超表面

智能超表面（RIS）技术采用可编程新型亚波长二维超材料，通过数字编码对电磁波进行主动的智能调控，形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场。智能超表面技术能够突破传统无线信道不可控特性，实现主动地控制无线传播环境，在三维空间中实现信号传播方向调控及增强或消除，抑制干扰并增强信号，构建 6G 智能可编程无线环境新范式。

RIS 技术具有电磁特性实时可编程的特点，允许超表面改变其电磁特性，从而实现传统超材料无法实现的各种功能。RIS 通常由大量精心设计的电磁单元排列组成，通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号，可以动态地控制这些电磁单元的电磁性质，进而实现以可编程的方式对空间电磁波进行主动的智能调控，形成幅度、相位、极化和频率等参数可控制的电磁场。作为一种全新且极具潜力的基础性关键技术，RIS 具有低成本、低功耗、易部署等特点，将能够支持绿色通信，使能智能无线环境，实现未来感知通信一体化。RIS 通过构建智能可控无线环境，将有机会给未来 6G 带来一种全新的网络范式。

RIS 的应用研究是跨学科的，需要无线通信、射频工程、电磁学和超材料等学科的协同配合。RIS 在未来无线网络中的应用将涵盖发射机、无线信道环境以及接收机组成的整体闭环无线传输链路，基于 RIS 的新型无线通信系统有望通过联合优化设计取得最佳的整

体性能。

目前针对 RIS 的研究仍处于初始阶段，亟待学术界和工业界共同探索和大力推进相关研究。RIS 未来技术发展和应用面临如下挑战：

- RIS 信道测量与建模：需要在考虑 RIS 的物理和电磁特性的基础上，建立不同情况下 RIS 辅助无线通信的自由空间路径损耗和小尺度衰落模型，并进行实验测量进一步验证。另外，需要考虑 RIS 信道模型与传统的通信理论框架具有内在的相容性。

- RIS 信道估计与反馈：利用 BS 和 RIS 位置固定的特点以及 RIS 单元阵列特性，设计低复杂度的信道估计方法来获得信号到达角等关键信息。可以通过挖掘 RIS 级联信道的结构化稀疏特征，提升信道反馈性能并降低信道估计开销。利用 RIS 信道矩阵低秩特性，构造联合稀疏矩阵并设计稀疏矩阵恢复来实现级联信道估计。

- RIS 波束赋形：RIS 辅助通信系统的波束赋形设计一般从优化的角度出发，将相移矩阵设计问题转化为特定目标的优化问题，进而通过各类优化方法进行求解。如果忽略硬件偏差的影响，假设理想硬件状态下的波束赋形算法将会在实际应用中产生严重的扭曲训练导频和期望接收信号，因此也需要考虑硬件受限下的波束赋形，需重点考虑离散相位、波束宽度、反射角度等硬件约束。

- RIS 控制与网络架构：RIS 是一种全新的技术，改变和控制传统电磁波的传输路径、用户接收的信号，对现有的通信系统与网络架构带来巨大的变化。RIS 部署优化设计的目标是寻求复杂度、成本及

性能的平衡，确定 RIS 部署位置、密度、RIS 形态、调控/协作关系等参数。

为加快 RIS 技术的成熟和商用，RIS 未来的主要研究方向包括：RIS 硬件架构及调控算法的研究、智能环境通信新理论和基带新算法的研究、无线网络新架构等。

- RIS 硬件架构及调控算法研究：探索具备对电磁信号特性实现独立控制的单元器件扩展；设计具有功能多样性的 RIS 阵列；探索紧密阵列，甚至全息 RIS 的可能性，在减少阵子耦合特性的情况下，提高系统的空间分辨率，吞吐和频谱效率；研究超高频段以及光频段 RIS 的硬件研究，扩展整体组网的灵活性；研究和设计 RIS 基础调控算法集合及其功能扩展的调控算法，灵活扩展 RIS 阵列的功能集合和拓展 RIS 新的应用场景。

- 智能环境通信新理论和基带新算法的研究：探索智能环境无线通信系统架构及传输体系设计的基础理论和方法论。例如，探索电磁信息理论，用其指导未来无线传输系统的设计。研究和开发高效的基带算法以支持 RIS 技术在无线系统中的广泛应用。

- 无线网络新架构设计方面的研究：探索多种传输场景下 RIS 网元功能的定义，RIS 和无线网络间的控制方式及对应的接口协议；研究在无线同构网络内或在无线异构网络内 RIS 的网络拓扑结构及部署方案；研究不同形态 RIS 联合组网的拓扑架构和部署方案；探索融合 RIS 的无线网络新架构的可扩展性、移动性、安全性、鲁棒特性及

时延特性等，并推动新型无线接入网络架构相关的标准化进程。

技术研判：RIS 作为一种全新且极具潜力的基础性关键技术，具有低成本、低功耗、易部署等特点，其典型应用包括覆盖空洞补盲、覆盖范围扩展、电磁干扰抑制，提升传输自由度、支持大规模连接及辅助感知与定位等。RIS 可与通感一体化、人工智能、太赫兹通信等技术紧密结合，共同为 6G 愿景服务。

2.2 全息无线电

全息无线电是通过 RF 干涉测量和 RF 计算全息技术实现电磁空间的重构（上行）和精密调控（下行），从而一方面实现无线通信超高分辨率的空-时-频全维复用，另一方面实现无线通信、成像和感知的融合。

对于全息无线电来说，通常的波前记录传感器是天线，所以需要—个连续孔径天线阵列来接收和测量信号波的连续波前相位。目前连续孔径天线阵列包括先进的 UTC-PD 紧耦合有源天线阵列、连续孔径的 RIS+传统的离散孔径有源天线阵，以及相干分布式天线或蜂群孔径（Swarm Aperture）等。在相干分布式天线或蜂群孔径天线中，每个天线的射频路径以某种方式同步和相干组合，多个同时工作的天线振子可以像连续孔径—样工作，通过合成全息（Synthetic Holography）实现全息无线电。

理论和建模上，上行链路通过空间谱全息或编码的孔径相关全息（COACH）实现全息电磁空间的再现与重构，下行链路通过空间波场

合成或时间反演（相共轭）实现电磁空间的全维调制与调控，并将全息无线电（或全息空口）概念和卷积定理结合在一起，同时将部分信号处理从数字层面转移到电磁层面（引入光学计算或超表面作为计算单元），以满足智能全息无线电在灵活性、低延迟、功耗和复杂性方面的要求。

2019 年，Marzetta 等人通过线性系统理论和傅里叶变换等深入探讨了全息无线信道模型。2021 年，Khodaei 等人提出了一种全息频谱复用（HSM）技术方案，利用超短脉冲的频谱空间，以二维全息图的形式生成线路码，实现超高数据密度的并行通信。当前美国特拉华大学已建立了一个基于微波光子天线前端和 SLM 光学计算的全息无线电实验平台，并基于 k 空间实现全息电磁空间重建和 RF 全息成像。美国 S2 公司基于全息无线电（空间谱全息）实现了一个极致宽带动态谱地图平台，瞬时带宽高达 40GHz。

在国内，北京交通大学对连续孔径的紧耦合天线阵的每一个天线振子对应的多径信道进行准确地表征及联合处理，得到全息无线电路的整体信道。南京航空航天大学深入研究了 K-空间层析成像和基于光子技术的实时傅里叶变换，实现了对空间频率（频率及空间位置）的测量及高分辨率成像。北京邮电大学提出了一种基于多模光纤的全息射频频谱压缩感知系统方案，在远小于奈奎斯特采样率的条件下实现了信号的全光压缩感知和高精度恢复。大连理工大学完成了基于微波光子三维信息处理的智能全息无线电功能验证系统设计，验证了全

息无线电感知与通信一体化功能。浙江大学提出近场全息无线电信道模型，并分析了信道自由度，实验验证了利用倏逝波可以提升全息无线电的近场自由度。

全息无线电不仅可以实现无线通信超高分辨率的空-时-频全维复用，大幅度提高通信容量，而且具有天然的全谱内生通信感知融合和真正的原生智能特性，但是目前仍有许多挑战，后续的研究方向建议重点放在：

- 完善空间谱全息或编码的孔径相关全息 (COACH)、空间波场合成或时间反演 (相共轭) 和 K 空间等理论、算法和建模，全息空间谱复用和解复用算法优化。

- 进一步优化全息微波信号到全息光学信号的高保真映射方案。

- 基于光、电和超表面的衍射神经网络和计算的层次化异构信号处理架构的评估验证。

技术研判：全息无线电尤其近场 RF 全息不仅可以实现接近瑞利衍射极限的空-时频全维复用，满足 6G 的超大容量需求。同时，基于光、电和超表面融合的新架构，全息无线电整个链路可以表征为层次化、异构和联邦学习的新型计算系统或衍射神经网络，有望实现能效和时延性能的极大提升，但是在工程化和产业化方面仍存在着大规模光电融合集成的挑战。

2.3 轨道角动量

轨道角动量 (OAM) 是电磁波的固有物理量，也是无线传输的新

维度。OAM 的物理量纲和电场强度的物理量纲线性无关，所以彼此独立。电磁波角动量包括自旋角动量和轨道角动量。根据是否与坐标系有关，OAM 可以分为“内禀 OAM”和“外部 OAM”两部分。电磁波从微观上看是由大量电磁波量子构成的，内禀 OAM 表征了电磁波量子波包针对其中心形成的 OAM，外部 OAM 则是针对定义的坐标系形成的 OAM。因此，内禀 OAM 不会随着外界空间坐标系的不同而发生变化，利用电磁波量子波包形成涡旋，可以构建量子态 OAM 涡旋电磁波量子传输系统，获得传统多天线 MIMO 传输以外的无线传输新维度，具有超越传统 MIMO 容量界的能力；外部 OAM 则会因为坐标原点选择的不同而发生变化，适用于统计态 OAM 涡旋波束。该波束也具有类似涡旋波包的螺旋相位面，适宜在点对点视距直射信道（LoS 信道）传输中获得正交信道和低复杂度，统计态 OAM 涡旋波束可用天线阵实现，因此也被认为是多天线 MIMO 传输特例。

在未来的 6G 链路中引入 OAM 传输技术，不仅可以获得频谱效率和链路传输速率的提高，而且可以获得较低的复杂度和成本，以及相对较低的功耗。统计态 OAM 涡旋电磁波目前主要用于点对点视距传输，场景仍局限于宏基站和微基站之间的数据中继传输，最新传输实验表明可以在 1km 距离上传输 1Tbps 数据量，频谱效率超过 50bit/s/Hz。统计态 OAM 涡旋波束在空口方面的应用正在结合大规模 MIMO 和智能超表面等 6G 技术展开研究；量子态 OAM 涡旋微波量子传输系统的研究近几年得到长足发展，虽然目前的实验系统仍旧体积大、

功耗大、复杂且笨重、技术成熟度低，但已经能够验证其在传输容量、复杂移动传输场景等的显著优点。在实际应用场景上，量子态 OAM 传输不再受限于统计态 OAM 传输那样的倒锥状波束，适用范围涵盖几乎所有复杂场景，可以建立灵活的 OAM 复用、OAM 多址、OAM 超窄带等无线传输系统。

由于传统无线传输系统均建立在电场强度之上，而 OAM 是独立于电场强度的传输新维度，其未来技术发展和应用面临如下挑战：

- 当前 OAM 传输技术研究中，存在着发展不均衡的问题。在射频无线通信中，统计态 OAM 涡旋波束研究早，研究团队多，技术成熟度高。但统计态 OAM 涡旋电磁波应用场景受限，主要应用于 LoS 信道环境。相比之下，量子态 OAM 涡旋电磁波不受 LoS 信道的限制，应用场景广泛，但相关研究仍处于探索阶段，技术成熟度低。因此，未来 OAM 研究方向应重点关注于量子态 OAM 涡旋电磁波传输技术；

- 不同于统计态 OAM 涡旋波束只需传统天线即可辐射，量子态 OAM 涡旋电磁波目前实验系统均借助相对论状态下电子高速回旋辐射产生，需要依赖于真空电子器件实现发射与接收，且工作在强磁场环境，同时需配备高压电源作为电子激励，相应产生装置的体积、功耗均较大，复杂且笨重，因此量子态 OAM 涡旋电磁波产生装置的小型化与高效化是未来其能否应用于移动通信的关键；

- 高移动性和海量用户接入也是未来移动通信的重要应用场景，而统计态 OAM 涡旋波束需要收发天线严格共轴对准，倒锥状发散波束

也限制了大容量传输距离，目前仅应用于收发端位置固定的回传链路（或前传链路）。然而在移动通信系统中，用户终端位置移动不固定，统计态 OAM 涡旋波束在“动中通”和用户空口应用场景下挑战较大，后续研究需要结合超大规模 MIMO 和智能反射面等技术，形成 MIMO-OAM 技术，进一步克服收发天线对准和波束发散的约束，扩大统计态 OAM 涡旋波束应用场景。

OAM 技术发展将有效缓解频谱资源紧张困境，并极大满足未来大容量传输需求，但仍然存在统计态涡旋波束传输技术和量子态涡旋电磁波技术发展不均衡，量子态 OAM 传输技术成熟度不高，统计态 OAM 涡旋波束传输应用场景受限等问题，后续将在拓宽统计态 OAM 涡旋电磁波应用场景，以及量子态 OAM 传输装置小型化等方面加大研究力度。

传统无线通信系统均指利用电磁波电场强度信号传输信息，并没有充分利用电磁波物理特性，探索以 OAM 为代表的电磁波无线传输新维度，需要加强以下技术方向的研究：

- 提升统计态 OAM 涡旋波束专用天线性能：目前统计态 OAM 涡旋波束多借助天线阵列，波束发散角大、产生模态有限、信道相关性高，容量提高有限，只能被看作多天线 MIMO 系统的特例。因此，如何设计并提升统计态 OAM 涡旋波束专用天线性能，降低涡旋波束发散角、提高辐射模态数、增大传输距离与传输容量，是统计态 OAM 涡旋波束传输技术发展的必经之路；

- 优化量子态 OAM 涡旋电磁波产生与接收装置设计：目前量子态 OAM 涡旋电磁波的产生与接收多借助真空电子器件实现，存在体积大、功耗高、效率低等缺点，难以满足无线通信灵活部署的需求。其技术尚处于探索阶段，成熟度低，目前还难以直接应用于移动通信。因此，如何设计优化量子态 OAM 涡旋电磁波产生与接收装置设计，实现涡旋微波量子辐射接收器件小型化与高效化，成为未来 OAM 技术研究重点。

技术研判：统计态涡旋波束在视距传输时可以较低系统复杂度获得正交信道，提升频谱效率和传输容量，支撑宏微基站大容量回传链路、高速近场通信（NFC）等，同时可结合超大规模 MIMO 和智能反射面等形成 MIMO-OAM 技术。

3、跨域融合技术

3.1 无线人工智能

无线人工智能是指通过将人工智能能力原生融合在无线系统中，深度挖掘利用无线数据和无线模型，由此形成的涵盖新型智能无线架构、无线空口、无线算法和无线应用在内的智能无线通信技术体系。它主要包括：一是原生智能的新型空口，即深度融合人工智能/机器学习技术，将打破现有无线空口模块化的设计框架，实现无线环境、资源、干扰、业务、语义和用户等多维特性的深度挖掘和利用，显著提升无线网络的高效性、可靠性、实时性和安全性，并实现网络的自

主运行和自我演进。二是原生智能的新型网络架构，即充分利用网络节点的通信、计算和感知能力，通过分布式学习、群智式协同以及云边端一体化算法部署，实现更为强大的网络智能，支撑未来各种智慧应用。

学术界和产业界围绕无线智能网络架构、无线智能空口、无线 AI 算法、无线 AI 数据集、无线语义通信等基础理论和关键技术展开了深入研究和探索，取得了一系列重要进展，获得如下重要结论和共识：

- AI/ML 能很好地表征和重构未知无线信道环境、有效跟踪预测反馈信道状态、挖掘利用大状态空间内在统计特征，大幅度提升物理层信号处理算法的性能。浙江大学、华为、东南大学等单位提出物理启发、数据驱动的新型深度生成网络模型和跨时空样本训练算法，实现了无线环境的高效表征重构、信道的精准预测和高效压缩反馈以及智能波束成形。清华大学还开展了基于视觉的信道预测和波束调控机制。众多单位开展了基于 ML 的信道编译码、高维信号设计以及多用户、多天线、多载波信号估计、检测与分离等方面的研究，证实了 AI 通信的可行性和有效性，显著提升了性能。

- AI/ML 能够智能挖掘利用无线网络时空频通信、感知和计算资源，有效协调干扰，实现多用户、多目标、高维度、分布式、准全局优化调度决策。浙大、清华、东南、上交、西交、北理工等单位研究和提出了多种基于深度强化学习、多代理学习、博弈学习、分布式马尔可夫决策和图神经网络的新型无线资源感知、调度机制，实现了干

扰的优化协调和资源的优化利用，提升了系统的能效、谱效和接入容量。

- 若干 AI/ML 架构能够很好地与无线网络拓扑、无线传输接入协议、无线资源约束、无线分布式数据特征相适配，从而有潜力构建新型无线智能网络架构。在此基础上进一步利用网络分布式算力和动态运力，自主适应无线网络分布式计算业务需求，实现网络高效资源利用、自主运行和智能服务。浙大、清华、上交大、华为、中国移动研究院等单位研究并提出了基于异步联邦学习、分层联邦学习、量化与剪枝神经网络、图神经网络、网络结构搜索与分割学习、知识蒸馏和迁移学习等的新型网络架构，与无线网络中心式/层次化架构、无线信道动态竞争共享容量和时延不确定特性相适配，为新型智能无线网络架构的设计提供了重要的参考和指导。

- 无线语义通信作为一种全新的智能通信架构，通过将用户对信息的需求和语义特征融入通信过程，有望显著提升通信效率、改进用户体验，解决基于比特的传统通信协议中存在的跨系统、跨协议、跨网络、跨人机不兼容和难互通等问题。北邮、浙大、上海交大、清华等高校研究和提出了基于 AI 的语义通信系统架构，探索了语义表征、编码、传输、重构等相关算法，开展了面向典型业务的语义通信系统技术验证，初步证实了语义通信在特定场景下的可行性和有效性。

- 无线数据隐藏结构特征复杂，跨时空分布式小样本问题突出，无线数据集的构建、访问、训练、迁移及其隐私安全保障将显著影响

无线 AI 系统的架构设计和算法部署。华为、中兴、OPPO、中国信息通信研究院等单位研究和探讨了无线数据集虚实结合的采样生成机制、扩展和利用方法、隐私安全原则和保障机制，为未来网络中无线数据的有效利用提供了重要的参考。

下一步宜深入探索无线智能通信系统在数据和算力需求、AI 通信计算综合效能方面的极限理论，重点推进无线智能网络架构、无线智能空口、无线 AI 算法、无线 AI 数据集等方面的标准化。

技术研判：无线 AI 将融入 6G 无线空口、网络架构、算法实现等各个层面，也将深度融合通信、计算、感知等多项功能，其性能潜力已得到初步证实，具备改变经典通信架构和通信范式的潜力。无线 AI 在预测、定位、压缩、调度、优化、调控、感知等方面应用潜力巨大，部分空口相关的标准技术讨论已开始启动。

3.2 通信感知一体化

通感一体化是指基于软硬件资源共享或信息共享，同时实现感知与通信功能协同的新型信息处理技术，可以有效提升系统频谱效率、硬件效率和信息处理效率。感知将成为 6G 网络中的原生能力，与通信能力互助共生，并为 6G 开辟新的应用前景。一方面，通信系统可以利用相同的频谱甚至复用硬件或信号处理模块完成不同类型的感知服务。另一方面，感知结果可用于辅助通信接入或管理，提高服务质量和通信效率。畅想面向 2030 年的信息社会，通信感知一体化将有力支撑以万物智联、通感共生、虚实交融为特征的新型信息基础设

施的加速构建。

在 2018 年 IEEE GlobeCom 大会上，业界首次提出基于无线频谱（特别是高频段）的通信感知一体化技术研究方向。国内多家公司和机构发布 6G 白皮书提出将通感一体化技术作为 6G 重要研究方向。此外，欧美等也在无线通信感知一体化领域有相应的产业研究和布局。2020 年，美国国防部高级研究计划局（DARPA）正式宣布成立“太赫兹与感知融合技术研究中心”（ComSenter），研究开发高容量和高精度的通信感知一体化应用能力。2021 年，欧盟 6G 旗舰研究项目 Hexa-X 将“高频和高分辨率定位和传感的全新无线电接入”列为重点研究方向之一。

6G 引入感知功能为通信感知一体化技术带来多方面的挑战。在一体化基础理论方面，无线感知通常是以目标检测概率、定位精度、分辨率和无模糊范围等作为评估标准，而通信通常是以通信容量、误码率以及多普勒容限等作为评估标准，如何构建通信感知一体化系统的评估则及互信息理论具有挑战性。此外，通感应用场景复杂，涉及智慧生活、产业升级、社会治理等方方面面，这使得通感一体化技术研究需要匹配不同的场景需求和应用特征，具有严峻的挑战。

通信感知一体化是 6G 重要的潜在技术方向之一，目前，通感一体化技术在需求场景、基础理论、空口及信号处理、组网架构、协同感知、硬件系统方面展开全方位研究，在一体化评估理论、信号融合算法等方面取得重要进展，并在通感一体化定位与跟踪、成像、模式

识别等技术的测试与验证方面取得阶段性成果。下一步，通信感知一体化技术将持续在空口技术、组网架构、协同感知、硬件架构、原型系统、仿真评估、标准化方向持续研究并开展工作

（1）通感一体化基础理论

通信感知一体化基础理论研究主要集中在通感一体化系统的理论框架和系统建模、性能评估准则、一体化性能理论极限和资源配置优化等方面，期望通过理论研究找出合理的评估方法、通信感知性能极限及折中方法。

（2）通感一体化空口关键技术

从当前的研究来看，波形设计可以分为两个主要研究方向：基于现有波形的一体化波形适配性研究，新型通感一体化波形设计及研究。基于现有通信和感知波形，如 OFDM、OTFS、FMCW、SC 等，通过分析这些波形在通信和感知的能力，形成单一波形或者复合波形，从而实现通感融合波形的需要。对于通信和感知融合波形的诉求分析，应当同时考虑波形的通信保障特性和感知的保障特性。

（3）通感一体化网络架构技术研究

通信感知一体化的组网架构主要包括了网络大脑、感知控制功能、通信控制功能、计算控制功能、用户控制功能、业务控制功能等功能实体，以及计算节点、通信节点、感知节点和终端节点等资源实体。未来将以业务连续性、QoS 保障为目标，开展不同感知模式及用例下的组网协议流程，节点切换，策略管理等关键技术研究。

（4）通感一体化协同感知技术研究

通信感知一体化需要考虑多模式、多节点、多频段、多制式的协同感知技术。在各自感知范畴及用例中，还需考虑协同感知流程，感知节点选择，感知信息融合，空间同步等协同感知关键技术。

（5）通感一体化硬件系统研究

通感一体化技术希望架构和硬件系统能同时实现感知和通信功能，因此系统在设计之初就要平衡好通信和感知需求，新增共享频谱资源、高动态范围、全双工及自干扰消除、高通道性能等特性要求，此外还需兼顾低实现复杂度、低功耗、高集成的目标。

（6）通感一体化原型验证研究

未来，通感一体化原型验证研究将把通信和感知功能集成在同一系统中，在全频谱、多场景开展通感一体化样机研究，从新波形、新制式和新架构等多个方向发力，实现新一代通感一体化原型技术验证。

技术研判：6G 通感一体化将分“业务共存、能力互助、网络共惠”三阶段逐步实现，通感一体化技术研究在业务共存阶段已取得阶段性成果，在场景，关键使能技术上取得初步共识。但实现空口和硬件资源的一体化还存在问题。未来通感一体化研究将逐步走向能力互助阶段，需从理论、空口、硬件、灵活组网、多站协作等方面展开探索，实现资源维度灵活感知。形成通信和感知的有机内生，促进通信和感知的互助增益，实现面向全频段的统一通感系统框架。

4、新型频谱技术

4.1 太赫兹通信

移动通信现有中低频段和毫米波频段难以满足太比特超高速率连接需求，通信频段将向具有超丰富频率资源的更高毫米波频段甚至太赫兹频段延伸。

太赫兹（Terahertz, THz）波指位于 0.1THz-10THz 频率之间频段的电磁波。太赫兹波的波长范围是 $30\ \mu\text{m}$ -3mm, 在整个电磁波谱中位于微波和红外波频段之间。太赫兹通信是以太赫兹频段作为载波实现无线通信的技术，相比于 5G 的 sub6G 频段和毫米波频段，太赫兹频段凭借丰富的频谱资源优势，受到学术界的热烈关注，也受到欧、美、日等国家区域和组织的高度重视，是目前极具潜力的 6G 关键候选频谱技术之一。

在太赫兹频谱分配方面，国际电信联盟（ITU）已经完成 100~275 GHz 用频业务的频率划分工作。在 2019 年世界无线电大会（WRC-19）上，为陆地移动业务和固定业务在 275~450 GHz 频率范围内新增四个全球标识的移动业务频段。近两年来，我国在太赫兹核心关键器件和通信原型系统开发上部分接近或达到国际先进水平。在太赫兹信道测量方面，国内已针对多频段，在多场景下完成实验，如陆地水面远距离、室内短距离、数据中心、移动场景等。在太赫兹通信关键技术方面，国内以众多高校和科研院所为代表的研究单位依托多个相关研究计划，与产业界联合推动产业发展，在如太赫兹波形、大规模阵列架

构、波束成形、定向组网、通感一体化等空口设计研究及新技术融合技术等领域均有进展。

由于太赫兹器件材料工艺物理受限，对太赫兹核心器件制造带来了线性和非线性的非理想失真挑战。同时太赫兹频段的超高频、超宽带、独特的分子吸收特性，太赫兹信道建模及关键技术，如基带信号处理、超大规模天线设计、极窄波束管理、定向组网和通信感知一体化等，有待实现技术产业突破：

- 高频核心器件研发：目前国产 220GHz 以下射频前端芯片性能与国外水平存在差距较小，但是 220GHz 以上频段差距明显。除此之外，现有通信器件不能满足超大带宽太赫兹信号的数模转换和高速基带处理功能，存在高频收发器件的设计挑战。

- 太赫兹信道建模：由于新频谱、新场景、新天线架构的加入，需要对典型太赫兹无线通信场景，如体内、室内外、空天地、以及星间等场景进行建模。而传统的单一建模方法难以权衡复杂度和准确性，无法满足 6G 应用场景的评估要求。

- 太赫兹超宽带基带信号处理：太赫兹通信传输速率高、频带宽、射频非理想特性突出，对超宽带信号采样、基带信号处理、基带数字电路设计等带来极大的挑战，尤其需要突破低复杂度和低功耗的高速基带信号处理和集成电路设计技术，满足太赫兹通信系统对体积、功耗、复杂度等产业化要求。

- 超大规模天线及极窄波束管理：为了补偿太赫兹信号高传输损

耗而使用的超大规模天线具有很高的复杂度和功率损耗，对天线架构设计带来挑战。并且，太赫兹频段存在波束分裂效应、极窄波束高精度对准等难题，这将面临波束对准开销大、阵列增益损失等挑战。

- 太赫兹定向组网：由于太赫兹传输的直射径阻挡和高传输损耗，太赫兹网络存在覆盖范围小和极窄定向组网波束管理挑战。在高密度高移动性网络中，存在移动设备频繁小区切换的问题，这给太赫兹组网的邻区发现和网络路由带来挑战。

- 太赫兹通信感知一体化：为实现 6G “数字孪生” 愿景，需要太赫兹网络在多层次实现通信与感知功能的融合。作为新兴融合技术，太赫兹通感一体化性能界尚无定论。并且由于资源共享，面临共波形、共硬件的通信感知一体化器件设计、联合通感协作的网络协议设计和软硬件验证平台搭建等挑战。

为了应对上述挑战，需要重视太赫兹核心器件缺口，开展太赫兹高频器件研发。为降低太赫兹器件功耗和成本，使用低精度 AD/DA 的收发体制及简化基带算法，在太赫兹通信中是一个有潜在的研究方向。在太赫兹超宽带信号处理上，一方面需降低对数模转换采样率需求，另一方面需研究低量化精度信号处理技术和低复杂度集成电路设计。为降低超大规模天线的复杂度，可设计混合数字-模拟架构的动态天线阵列架构，并可引入时延器，设计联合相移时延天线架构消除波束分裂效应。太赫兹极窄定向组网需要加快对太赫兹网络构架、组网方式、移动性管理等方面的研究，探索多跳通信、新型切换算法和开销

网络寻址等。针对太赫兹极窄波束管理问题，研究基于射频地图感知的信道估计关键技术，突破信道估计传统框架，实现快速追踪和可靠切换。太赫兹通信感知一体化的实现需权衡通感共存机制，设计共口径硬件和联合性能优化的一体化波形。

太赫兹通信有很高的技术应用价值和潜力，有较大可能在未来 6G 通信系统中起到关键的支撑作用。要保证未来太赫兹通信的大规模商用落地，太赫兹关键技术的突破进展需要满足 6G 技术功能需求，太赫兹通信产业链成熟度需要满足运营商等应用方的系统建设成本和运营成本需求，基于此提出三点后续研究方向建议：

- 发展从芯片到系统的太赫兹通信产业链：太赫兹作为新开发利用的频谱资源，太赫兹器件的材料、结构和工艺不同于现在比较成熟的微波和毫米波频段，世界各国都尚未形成成熟的太赫兹通信芯片与设备的产业链，这是太赫兹通信应用面临的重要挑战，因此，需要通过应用导向，系统牵引，加快发展从芯片到系统的太赫兹通信产业链。

- 发展绿色节能的太赫兹通信技术：太赫兹频段频率更高，依据电磁波的传播特性，这个频段的传播与穿透损耗也更大。太赫兹相比 3.5GHz 频段自由空间路径损耗增加 30-50dB，比 26GHz 毫米波频段路径损耗增加 10-35dB。因此，绿色节能是未来 6G 太赫兹通信应用落地的必然需求，建议从低能耗太赫兹组件的研发和技术突破、高能效太赫兹通信系统空口设计、协同智能节能网络运维等多个维度发展绿色节能的太赫兹通信技术。

- 推进太赫兹通信与其他 6G 无线新技术融合：未来包括太赫兹在内的整个 6G 高频通信技术发展的主题是“融合”。高频通信作为 6G 潜在的应用技术，不会是一种单独发展和推进的技术，需要和其它 6G 无线技术实现有效融合，构成整体的 6G 无线空口方案，其中包括与感知技术的融合，与超大规模天线的融合，与智能超表面技术的融合等其它无线技术的融合。

技术研判：太赫兹通信技术发展的重心在于高频核心器件研发、太赫兹空口关键技术研发和高效灵活的太赫兹组网。需要结合应用导向，加快从芯片到系统的太赫兹通信产业链成熟化，向绿色节能、多种新兴技术融合的太赫兹通信发展。

4.2 无线光（可见光及红外波段）通信

随着无线技术在各行业的广泛应用，移动数据呈现爆炸式增长，有限的无线频谱资源越来越难以满足日益增长的无线频谱需求。无线光通信（optical wireless communication，OWC）可以利用的可见光及红外波段尚属空白频谱，无需授权即可使用，而 OWC 又具有照明和通信，以及感知结合，无电磁干扰，绿色环保等优势，因此，OWC 作为解决最后一公里无线接入的一个重要手段。无线光通信具有多达 400THz 的候选频谱，具有传输速率达到 100Gbps，流量密度达到 0.5Gbps/m³ 的潜力，是拓展新频谱，提升网络容量的重要候选技术之一。此外基于半导体照明的无线光通信技术可与照明及感知系统深度融合，在室内热点高容量场景具有大规模部署的潜力。

受到器件的制约，无线光通信仍需要新型基础器件的支持。现阶段的无线光通信感知一体光源带宽需要继续扩展、探测器灵敏度、响应度等需要提高。在信道建模方面，还缺少实际工作场景的模型优化和应用测试；在传输与组网技术方面，需要结合高性能可见光器件特性与无线光信道特性进行针对性的设计，并与传统的射频通信一起形成无线光融合异构网络，以支持移动场景的连续高速率业务；在系统集成方面，如何进行系统小型化与集成也是无线光通信产业化需要克服的问题之一。

OWC 是一种新型的通信架构，使用可见光及红外波段进行通信。但是传统的可见光及红外波段的发光器件通常仅针对照明或者感知性能做出优化，且鲜有面向可见光及红外波段设计的高速光电探测器。因此，OWC 面临着包括核心器件、围绕核心器件特性的基础技术以及成果转化落地等方面的诸多挑战：

- 作为支撑 OWC 的硬件系统，白光光源和光电探测器作为可见光及红外通信系统的核心元器件，是实现超高速率无线光通信的基础，因而备受研究瞩目。高性能的光源与光电探测器不仅能从本质上直接提升系统性能，更是能对光通信无线技术发展提供硬件支持，从根本上决定了光信号的发射、传输、接收与转换，是影响整个无线光通信系统数据传输的关键。

- OWC 系统中所使用的发光器件、探测器件以及信道在通信特性上均与传统无线通信系统中有较大区别，OWC 算法需要针对这些特性

而设计。目前，OWC 系统的物理层通信算法，包括调制格式、波形设计、信道均衡等均已较为成熟，但大气与水下信道特性研究、多址接入、抗失准、物理层安全、感知算法等探索研究与概念验证工作尚需进一步完善。

- OWC 缺少专用芯片级支撑，相关标准、成果应用及转化尚不成熟。目前，无线光跨网跨域安全传输设备已量产，已陆续在军队及政府部门使用。但民用领域鲜有示范应用案例，且 OWC 系统的小型化和芯片级集成仍具有一定挑战。此外，OWC 相关标准也较为缺乏。

从上述讨论我们不难看出，可见光通信技术有望满足诸如流量密度、用户体验速率等重要需求，并提升峰值速率、网络能效、定位精度、高精度感知、健康监测、3D 环境重构等几个方面的网络性能，还能扩展水下无线通信覆盖。如何完善 VLC 系统的基础研究，推进 OWC 支撑产业与标准，真正实现 VLC 的落地应用，是当前 OWC 系统研究面临的核心问题，也是未来需要努力的方向：

- 可见光及红外收发器件研究：开展适合可见光波段、红外波段以及紫外日盲区波段的光无线通信的光源、探测器、光天线等器件及芯片研发；

- 融合场景及技术和信道：可见光及红外大气、室内、水下等信道及场景研究，并论证系统能力，与其他 6G 技术进行融合；

- 光无线通信感知融合：发挥无线光在感知和通信两方面的优势，支持 6G 通感融合研究；

- OWC 与 AI 融合：可见光与 AI 的结合具有重要科学价值，通过 AI 提升 OWC 信号处理性能；还可通过可见光丰富光子计算实现途径；

- 移动和非视距突破：持续进行非视距和移动性能提升的相关技术研究；

- 标准化与产业化：产业界联合研讨光谱非授权新频谱在未来标准和产业推动的路径。

技术研判：无线光通信相比于传统射频通信，具有抗电磁干扰、高保密性、兼容性好、能耗低、数据传输速率快等优势，可应用于深海探测、航天卫星和智慧城市等领域，对国防和国民经济建设具有重大意义，并能在照明通信一体化、感知通信一体化等新特性方面发挥重要作用。但目前无线光通信的基础器件和芯片产业尚不成熟，在信道建模、组网、系统集成等方面也面临比较大的挑战，需要针对特点及优势开展进一步研究，推进标准化，力争早日推广应用。

5、信道测量与建模

信道测量与建模是基于高精度信道测量平台获得的原始信道数据，结合统计学方法，通过数学的方式来刻画信道特性，揭示多径的传播机理，探索和掌握信道变化的规律、精确模型和容量机理，为移动通信系统技术评估、设备研发、系统设计和网络部署提供基础。6G 信道研究呈现出在频率、带宽、空域、场景、技术等维度持续扩展的趋势。例如，更高的频段（太赫兹、可见光）和更大的带宽，更高谱效和更先进的技术（超大规模天线阵列、智能超表面、通信感知一体

化等)，以及更广泛的通信场景（空、天、地、海）等，这些都对 6G 信道测量与建模的研究提出了新的挑战。

国内各大研究机构和组织围绕太赫兹通信技术、可见光通信技术、智能超表面技术、通信感知一体化技术等开展了相应的信道测量与建模研究工作，分析了典型室内外场景信道的大、小尺度衰落特性，构建了新型信道模型。整体来看，国内外 6G 信道测量与建模的研究目前还处于初期探索阶段，在某些细分研究方向取得了一定的研究成果。但是，现有信道测量平台不完善，信道测量数据不全面，信道特性与新现象规律研究不充分，信道建模方法无法达到精确度、复杂度与普适度的平衡，距离达成领域共识、形成普遍认可的 6G 信道模型还有一定的差距。

由于 6G 引入新频段、新场景以及新技术，信道测量与建模面临三大挑战：

- 频率跨度大。一方面，6G 应用更高的频段、更宽的带宽，电磁波能量随距离衰减较快，电波传播可能会呈现出更加明显的粒子性，导致信道大、小尺度衰落特性发生显著变化并可能出现一些新特性。另一方面，搭建宽带和高频信道测量平台从更高频率和更宽频带的信道中获得可靠和频率跨度如此巨大的精确信道特性是具有挑战性的。

- 通信场景复杂。考虑到超高速移动、空-天-地-海多域空间等场景，物理环境更加复杂，各场景下的散射体分布、地形特征、收发端移动状态、天气等因素都会呈现较大差异，支持上述复杂通信场景

的基础上如何建立准确、可信的模型理论是具有挑战性的。

- 技术多样。未来 6G 系统中，可能会采用超大规模 MIMO/全息 MIMO、智能超表面、通信感知一体化等更加多样的技术，不同技术测试评估所需要的模型特征是有区别的。如何精确地捕获这些技术下的信道新特征和规律，并低复杂度地融入到 6G 模型理论框架里，用于支持上述技术的研究评估是具有挑战性的。

信道测量与建模是 6G 重要的研究方向之一，在 6G 技术评估、系统设计和网络部署等方面发挥重要作用。但是，现有的统计性信道模型缺乏物理含义，确定性信道模型复杂度高，智能化信道模型泛化性差，未能在精确度、复杂度和通用性之间达到较好的平衡。后续应继续探索信道随频率、场景等变化的规律，研究 6G 多种技术下的信道数学表征理论模型，建立高精度、低复杂度、强普适性的 6G 信道模型。

综上所述，未来 6G 无线信道测量与建模将从多频谱、多场景、新特性和新方法四个维度展开研究工作：

- 多频谱：6G 信道建模将由低频段、毫米波频段向太赫兹、可见光等更高的频段扩展。一方面，更高频段对信道测量硬件系统的准确性提出了更高的要求。另一方面，较短的波长使得太赫兹、可见光频段呈现出独特的传播特性。目前，业界缺乏 100 GHz 以上标准化信道模型，形成频谱维度统一的标准化 6G 信道模型是未来信道研究的重要工作。

- 多场景：6G 信道测量与建模研究将覆盖涵盖空、天、地、海等物理环境，全面深入移动通信、高精度感知、垂直行业等应用场景。因此，6G 信道模型还需考虑具有场景独特性的测量系统和特征模型。

- 新特性：6G 通信将引入超大规模阵列天线、智能超表面、通信感知一体化等全新的空间、节点和应用方面的特性需求，每种新的特性需要考虑不同的信道建模方法，涉及传播理论、信道特征、新型天线、传播机制等诸多问题。

- 新方法：面对多频谱、多场景、新特性对 6G 信道模型的需求，传统单一的建模方法无法支撑模型需求，应从多方面展开建模方法论研究，如统计性建模、确定性建模、混合信道建模等。此外，在信道建模方法论研究工作中还需结合评估场景，考虑信道模型对系统及链路仿真的评估需求。

四、总结

当前正处于 6G 概念形成及关键技术研究的重要阶段，6G 概念和愿景需求正在逐渐清晰，关键技术方向也在逐渐收敛，本报告结合 IMT-2030 (6G) 推进组研究进展，初步提出了 6G 概念，明确了推动 6G 发展的驱动力，提炼形成了 6G 典型应用场景及关键能力指标体系。同时，报告还从技术定义、研究现状、面临挑战及未来研究方向等维度进行了关键技术分析，对重点技术方向做出了技术研判。

下一步，针对 6G 愿景需求及关键技术研究，如下几个方面需

要重点关注：

一是加快推动形成 6G 概念共识。未来一年将是 6G 概念形成的关键时期，积极推动对 6G 典型场景及关键能力指标研究，强化国际交流与合作，在 ITU 标准组织框架下，加快推动形成全球 6G 概念共识。

二是逐步推动 6G 关键技术收敛。通过技术研究、试验等手段，逐步深化技术研究，以 2030 年标准化和产业化为目标，分析筛选出有潜力的 6G 关键技术方向，加快推动研样研发、测试评估，研究解决产业化中的瓶颈问题，逐步形成具备工程和商用价值的 6G 关键核心技术。

三是重点关注 6G 系统架构研究。当前业界研究的重点是单点技术，通信感知融合、网络智能化将成为 6G 重点发展方向，传统的系统架构面临新的挑战。应尽早启动 6G 系统架构研究，明确 6G 系统功能特征和架构特征，提出系统设计的核心原则，指导 6G 关键技术研究，为 6G 国际标准研制奠定坚实基础。

四是全面提升产业基础支撑能力。相比于 5G，6G 将实现更高的性能，更高的工作频段、更大的带宽、更高的数据传输速率对芯片、器件等基础产业提出更高要求，当前的产业支撑能力难以满足 6G 大规模商用需求，需要提前布局，尽早突破产业发展瓶颈，为 6G 产业化及商用发展奠定基础。



联系方式

邮箱: imt2030@caict.ac.cn

COPYRIGHT@2022 IMT-2030(6G)PROMOTION GROUP.

ALL RIGHTS RESERVED.