



6G总体愿景与潜在关键技术 白皮书



IMT-2030 (6G) 推进组
2021年6月

目录

一、6G总体愿景

P1

二、6G发展的宏观驱动力

P3

三、6G潜在应用场景

P6

四、6G潜在关键技术

P14

五、对6G发展的几点思考

P24

缩略语简表

P26

参考资料

P28

主要贡献单位

P29

6G将构建人机物智慧互联、智能体高效互通的新型网络，在大幅提升网络能力的基础上，具备智慧内生、多维感知、数字孪生、安全内生等新功能。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，助力人类走进人机物智慧互联、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。

到2030年，社会服务均衡化、高端化，社会治理科学化、精细化等发展需求将驱动6G为人类社会提供全域覆盖、虚实共生的联接能力；技术产业的突破创新、生产方式的转型升级将驱动6G向跨界协同、细智高精的方向迈进，成为推动经济增长的新引擎；环境可持续发展以及应对重大突发性事件的需求将推动6G构筑起横跨天地的网络连接，实现从人口覆盖走向地理全覆盖。

（一）社会结构变革驱动力

收入结构失衡要求数字技术提升普惠包容。当今社会，世界贫富差距不断拉大，潜藏巨大经济社会风险。国际电信联盟提出，要利用信息通信技术促进实现联合国可持续发展目标。大数据、人工智能、全息感知等技术将有效助力在教育、医疗、金融等多方面普惠扶贫措施的落地，是应对世界收入失衡挑战、助力各群体协同发展、全面提升人类福祉的强大工具。与此同时，全球中产阶级将从2009年近18亿增长到2030年50亿，中产阶级规模扩大推动高品质智慧服务加速普及。全息视频、3D视频、感官互联等应用使生活娱乐方式不再受时间和地点的限制，大大提升人们以自我需求为中心的智能生活以及深度沉浸的全息体验。新一代数字技术将极大地满足人们个性化、高

端化的生活需求。

人口结构失衡呼唤数字技术提升人力资本及配置效率。当前，全球面临日益严峻的人口年龄结构问题，发达国家正经历老龄化、少子化的严峻挑战，新兴经济体在享受人口红利后，也深陷人口数量放缓和经济稳定增长之间的矛盾。据联合国统计数据，过去七十年间全世界65岁及以上老年人口的比例从5.1%增长到9.1%，世界总和生育率（TFR）从5.05降至2.45。到2030年，全球人口数量将达到85亿，其中65岁以上的老年人将达到10亿[2]，届时人类社会将进入老龄化时代，直接导致劳动力供给下降。在新一代产业革命与科技变革的驱动下，经济发展将更多依靠人力资本要素而非劳动力绝对数量。一方面，通过智能化技术与工具的创新运用，将实现对劳动力的智能替代和生产效率的有效提升，全面发展的智能劳动力将会弥补人力不足，无人生产线、无人工厂等一批无人化应用将获得推广普及。另一方面，6G技术通过服务不同群体差异化的需求，将激发在教育、医疗、文娱等领域的革命性创新，促进全球人力资本的提升。

社会治理结构变化倒逼社会治理能力现代化。未来社会治理主体将进一步多元化，随着社会治理创新能量的逐步释放，企业、个体等社会力量将通过开放数据资源和生态被激活，政府逐渐不再是社会治理的唯一主导和执

行者，社会治理容量将大大提升。同时治理架构和治理过程将更加扁平化，社会治理体制机制与信息技术手段相互融合、适配，社会管理服务体系呈现全要素网格化发展态势，原有信息传递规则被打破，信息和数据由单中心传播向多中心传播转变，社会治理场景的动态性、复杂性和不可预知性极大增加。在未来更加多元化、扁平化的社会治理结构下实现治理的科学化和精准化，需要通过数字孪生赋能社会治理，打破不同领域壁垒、打通不同层级的信息边界，通过虚拟镜像还原物理空间，利用人工智能等技术实时模拟复杂社会事件和动态变化，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。

（二）经济高质量发展驱动力

经济可持续发展需要新技术注入新动能。2008年全球金融危机后，主要经济体全要素生产增长率多年下降，全球经济增长持续放缓，亟需新的技术产业注入新动能，点燃经济持续发展的新引擎。突破传统经济增长范式，推动生产方式向更高质量、更加智能方向转变，是世界经济实现高质量发展的必由之路。到2030年，劳动力主要参与者将不再局限于人与机器，人、机、物都将成为生产者，共同主导跨界协同生产，高精度、高可靠、准实时的信息传输在各类软硬件设备上无缝互通，机、物将具备对人类情感、思想、心理状态等的智能交互感知能力并能开展跨空间的劳动协作。无人生产或人-机-

物协同生产，以及与大数据、云计算、数字孪生等技术的集成运用，将推动产业全智能化转型，进一步提高生产创新力。

服务的全球化趋势要求进一步降低全方位信息沟通成本。全球化是经济发展的助推器，通过全球性的分工协作带来更低的成本和更高的效率。工业革命以来，生产制造和运输物流效率大幅提升，国际分工从最终产品生产转向产品生产中间环节，中间品贸易和大型跨国公司兴起。近年来，新一代信息技术快速发展，使得信息和知识传播的成本持续下降，数据流成为物资流、技术流、资金流和人才流的重要牵引，平台成为集聚资源、推动协同、提升效率、构筑生态的重要组织形式，国际分工从物理世界延伸至数字世界。未来数字孪生、全息感知、沉浸式交互等新一代数字技术快速发展将进一步降低人与人、人与机、人与物之间的沟通成本，国际贸易将从货物转向服务、从现实转向虚拟发展，助力国际分工更加协调、产业分布更加合理、生产效率进一步提高。

（三）环境可持续发展驱动力

降低碳排放、推动“碳中和”要求提升能效、实现绿色发展。一是对6G绿色节能提出新的发展要求。2020年9月，中国宣布力争二氧化碳排放于2030年前达到峰值，2060年努力实现碳中和。截至目前，全球已有120多个国家和地区提出碳中和目标，对未来6G等移动通信设施提出更高的能效要

求，加速推动产业的节能和绿色化改造。二是高耗能行业的绿色低碳转型亟需6G提供更加精准、高效的数字化管理能力。如电力领域，智能电网的运行态势监测、应急指挥调度等功能要求6G提供更安全、更可靠、更高效的感知和分析能力，助力电力系统提效；建筑领域，“装配式”建筑工厂推广、智能制造质量管控与安全监管等要求6G提供更完善的数字化设计体系和人机智能交互能力；工业领域，工厂需借助6G高速率、海量连接的优势推进工业生产全流程动态优化和精准决策，助力工业企业节能减排。

极端天气、疫情等重大事件驱动建立更广泛的感知能力和更密切的智能协同能力。

一是全球极端气候变化等“绿天鹅”事件频发，催生环境实时精准感知体系和高智能协同

调度系统。根据世界气象组织《2020全球气候状况报告》，2020年是有记录以来三个最暖年份之一，洪水、飓风、火灾等给相关国家造成数百亿美元的损失。为更好地满足全方位生态保护、环境可持续发展监测的需求，通信网络要具备超越陆地、跨越海洋的连接能力，使分布在高山、雨林、草原中的传感器智能连接，实现环境生态预防、监测、保护、救援等管理闭环。二是全球蔓延的疫情等重大突发性事件需要跨地区共同应对，对区域协同和资源调度能力提出更高要求。未来为更好地应对重大突发性事件，提高资源利用效率，亟需6G为代表的移动通信技术进一步发挥地海空天全覆盖优势，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。

面向2030年及未来，6G网络将助力实现真实物理世界与虚拟数字世界的深度融合，构建万物智联、数字孪生的全新世界。沉浸式云XR、全息通信、感官互联、智慧交互、通信感知、普惠智能、数字孪生、全域覆盖等全新业务在人民生活、社会生产、公共服务等领域的广泛深入应用，将更好支撑经济高质量发展需求，进一步实现社会治理精准化、公共服务高效化、人民生活多样化，推动在更高层次上践行人民为中心的发展理念，满足人们精神和物质的全方位需求，持续提升人民群众的获得感、幸福感和安全感。

（一）沉浸式云XR：虚拟空间的广阔天地

扩展现实（XR）是虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）等的

统称。云化XR技术中的内容上云、渲染上云、空间计算上云等将显著降低XR终端设备的计算负荷和能耗，摆脱了线缆的束缚，XR终端设备将变得更轻便、更沉浸、更智能、更利于商业化。

面向2030年及未来，网络及XR终端能力的提升将推动XR技术进入全面沉浸化时代。云化XR系统将与新一代网络、云计算、大数据、人工智能等技术相结合，赋能于商贸创意、工业生产、文化娱乐、教育培训、医疗健康等领域，助力各行业的数字化转型。

未来云化XR系统将实现用户和环境的语音交互、手势交互、头部交互、眼球交互等复杂业务，需要在相对确定的系统环境下，满足超低时延与超高带宽才能为用户带来极致体验。现有的云VR系统对MTP¹时延



图2 沉浸式云XR：虚拟空间的广阔天地

¹ Motion-to-Photons 头动响应。MTP时延即从用户运动开始到相应画面显示到屏幕上所花的时间。

的要求不高于20ms，而现有端到端时延则达到了70ms。面向2030年及未来，基于云化XR的总时延将至少低于10ms。根据虚拟现实产业推进会测算，虚拟现实用户体验要

（二）全息通信：身临其境的极致体验

随着无线网络能力、高分辨率渲染及终端显示设备的不断发展，未来的全息信息传递将通过自然逼真的视觉还原，实现人、物及其周边环境的三维动态交互，极大满足人类对于人与人、人与物、人与环境之间的沟通需求。

未来全息通信将广泛应用于文化娱乐、医疗健康、教育、社会生产等众多领域，使人们不受时间、空间的限制，打通虚拟场景与真实场景的界限，使用户享受身临其境般的极致沉浸感体验。但同时，全息通信将对信息通信系统提出更高要求，在实现大尺寸、高分辨率的全息显示方面，实时的交

达到完全沉浸水平，角分辨率需达60 ppd，帧率不低于120 Hz，视场角不低于130°，每像素12 bit，且能够在一定程度上消解调焦冲突引发的眩晕感，按压缩比100计算，吞吐量需求约为3.8 Gbps。

交互式全息显示需要足够快的全息图像传输能力和强大的空间三维显示能力。以传送原始像素尺寸为1920×1080×50的3D目标数据为例[3]，RGB数据为24 bit，刷新频率60 fps，需要峰值吞吐量约为149.3 Gbps，按照压缩比100计算，平均吞吐量需求约为1.5 Gbps。由于用户在全方位、多角度的全息交互中需要同时承载上千个并发数据流，由此推断用户吞吐量则需要至少达到Tbps量级。对于全息通信应用于“数字人”的靶向治疗、远程显微手术等特殊场景，由于信息的丢失意味着系统可靠性的降低，且为满足时延要求，传输的数据通常不可以选择重传，所以要求数据传输具有超高安全性和可靠性。



图3 全息通信：身临其境的极致体验

（三）感官互联：多维感官的交融响应

视觉和听觉一直是人与人之间传递信息的两种基本手段，除视觉和听觉外，触觉、嗅觉和味觉等其它感官也在日常生活中发挥着重要作用。面向2030年及未来，更多感官信息的有效传输将成为通信手段的一部分，感官互联可能会成为未来主流的通信方式，广泛应用于医疗健康、技能学习、娱乐生活、道路交通、办公生产和情感交互等领域。畅想未来，远隔重洋的家庭成员或许不再为见面而跨越大半个地球，通过感官互联设备将会让他们感受到一个拥抱、一次握手的温度；坐在家中便可漫步马尔代夫海滩，体验沙子滑落指间和海风沁人心脾的感觉。

为了支撑感官互联的实现，需要保证触觉、听觉、视觉等不同感官信息传输的一致性与协调性，毫秒级的时延将为用户提供较好的连接体验。触觉的反馈信息与身体的姿态和相对位置息息相关，对于定位精度将提出较高要求。在多维感官信息协同传输的要求下，网络传送的最大吞吐量预计将成倍提升。安全方面，由于感官互联是多种感官相互合作的通信形式，为保护用户的隐私，通信的安全性必须得到更有力的保障，以防止侵权事件的发生。感官数字化表征方面，各种感觉都具有独特的描述维度和描述方式，需要研究并统一其单独和联合的编译码方式，使得各种感觉都能够被有效地表示。



图4 感官互联：多维感官的交融响应

（四）智慧交互：情感思维的互通互动

依托未来6G移动通信网络，有望在情感交互和脑机交互（脑机接口）等全新研究方向上取得突破性进展。具有感知能力、认知能力、甚至会思考的智能体将彻底取代传统智能交互设备，人与智能体之间的支配和被支配关系将开始向着有情感、有温度、更加平等的类人交互转化。具有情感交互能力的智能系统可以通过语音对话或面部表情识别等监测到用户的心理、情感状态，及时调节用户情绪以避免健康隐患；通过心念或大脑来操纵机器，让机器替代人类身体的一些机能，可以弥补残障人士的生

理缺陷、保持高效的工作状态、短时间内学习大量知识和技能、实现“无损”的大脑信息传输等。

在智慧交互场景中，智能体将产生主动的智慧交互行为，同时可以实现情感判断与反馈智能，因此，数据处理量将会大幅增加。为了实现智能体对于人类的实时交互与反馈，传输时延要小于1ms[4]，用户体验速率将大于10Gbps[5]；6G智慧交互应用场景，将融合语音、人脸、手势、生理信号等多种信息，人类思维理解、情境理解能力也将更加完善，可靠性指标需要进一步提高到99.99999%[6]。



图5 智慧交互：情感思维的互通互动

（五）通信感知：融合通信的功能拓展

未来6G网络将可以利用通信信号实现对目标的检测、定位、识别、成像等感知功能，无线通信系统将可以利用感知功能获取周边环境信息，智能精确地分配通信资源，挖掘潜在通信能力，增强用户体验。毫米波或太赫兹等更高频段的使用将加强对环境和周围信息的获取，进一步提升未来无线系统的性能，并助力完成环境中的实体数字虚拟化，催生更多的应用场景。

6G将利用无线通信信号提供实时感知功能，获取环境的实际信息，并且利用先进的算法、边缘计算和AI能力来生成超高

分辨率的图像，在完成环境重构的同时，实现厘米级的定位精度，从而实现构筑虚拟城市、智慧城市的愿景。基于无线信号构建的传感网络可以代替易受光和云层影响的激光雷达和摄像机，获得全天候的高传感分辨率和检测概率，实现通过感知来细分行人、自行车和婴儿车等周围环境物体。为实现机器人之间的协作、无接触手势操控、人体动作识别等应用，需要达到毫米级的方位感知精度，精确感知用户的运动状态，实现为用户提供高精度实时感知服务的目的。此外，环境污染源、空气含量监测和颗粒物（如PM2.5）成分分析等也可以通过更高频段的感知来实现。



图 6 通信感知：融合通信的功能拓展

（六）普惠智能：无处不在的智慧内核

到2030年，越来越多的个人和家用设备、各种城市传感器、无人驾驶车辆、智能机器人等都将成爲新型智能终端。不同于传统的智能手机，这些新型终端不仅可以支持高速数据传输，还可以实现不同类型智能设备间的协作与学习。可以想象，未来整个社会通过6G网络连接起来的设备数量将达到万亿级，这些智能体设备通过不断的学习、交流、合作和竞争，可以实现对物理世界运行及发展的超高效率模拟和预测，并给出最优决策。

在网络运维方面，AI智能体将把数据转化为信息，从实战中学习积累知识和经验，提供数据分析和决策建议，支撑海量数据处理和零延迟智能控制，并且根据感知到的环境变化对网络中心和边缘进行负载调整和协

调，处理接入和突发传输请求。在未来的智能工厂中，大量用于生产的协作机器人可以通过智能体实现信息的交互与学习，不断更新自身模型，优化制造流程。6G的智能设计还可以为无人机集群、智能机器人等无人系统提供实时动作策略，让无人终端高效、精准地利用资源，实现高效控制与高精度定位。图像、语音、温度等数据也可以用于智能学习与协作，AI将把局部数据连接起来，在特定环境下实现不同智能终端之间可靠、低时延的通信和协作，并且通过大数据不断学习持续提升工作效率和准确性。

AI应用的本质就是通过不断增强的算力对大数据中蕴含的价值进行充分挖掘与持续学习的过程，从6G时代开始，网络自主学习、自运行、自维护都将构建在AI和机器学习能力之上。网络自身就像一个“棋圣”，能够从容应对各种实时的变化。6G网络将



图7 普惠智能：无处不在的智慧内核

通过不断的自主学习和设备间协作，持续为整个社会赋能赋智，真正做到学习无处不在，永远学习和永远更新，把AI的服务和应用推到每个终端用户，让实时、可靠的AI智能成为每个人、每个家庭、每个行业的忠实伙伴，实现真正的普惠智能。

（七）数字孪生：物理世界的数字镜像

随着感知、通信和人工智能技术的不断发展，物理世界中的实体或过程将在数字世界中得到数字化镜像复制，人与人、人与物、物与物之间可以凭借数字世界中的映射实现智能交互。通过在数字世界挖掘丰富的历史和实时数据，借助先进的算法模型产生感知和认知智能，数字世界能够对物理实体或者过程实现模拟、验证、预测、控制，从而获得物理世界的最优状态。

未来6G时代将进入虚拟化的孪生数字世界。在医疗领域，医疗系统可以利用数字孪生人体的信息，做出疾病诊断并预判最佳治疗方案；在工业领域，通过数字域优化产品设计，可降低成本并提高效率；在农业领域，利用数字孪生进行农业生产过程的模拟和推演，可以提前预知不利因素，提高农业生产的能力与土地利用效率；在网络运维领域，通过数字域和物理域的闭环交互、认知智能、以及自动化运维等操作，网络可快速适应复杂多变的动态环境，实现规划、建设、监控、优化和自愈等运维全生命周期的“自治”。

数字孪生对6G网络的架构和能力提出了诸多挑战，需要6G网络拥有万亿级的设备连接能力并满足亚毫秒级的时延要求，以便能够精确实时地捕捉物理世界的细微变化。通过网络数据模型和标准接口并辅以自



图8 数字孪生：物理世界的数字镜像

纠错和自生成的能力，使得数据质量得到保障。考虑到数据隐私和安全需求，需要6G网络能够在集中式和分布式架构下均可进行数据采集、存储、处理、训练和模型生成。此外，6G网络还需要达到Tbps的传输速率以保证精准的建模和仿真验证的数据量要求，通过快速的迭代寻优和决策，按需采取集中式或分布式的智能生成模式。

（八）全域覆盖：无缝立体的超级连接

目前全球仍有超过30亿人没有基本的互联网接入[7]，其中大多数人分布在农村和偏远地区，地面通信网络高昂的建网成本使电信运营企业难以负担。无人区、远洋海域的通信需求，如南极科学考察的高速通信、远洋货轮的宽带接入等，也无法通过部署地面网络来满足。除了地球表面，无人机、飞

机等空中设备也存在越来越多的连接需求。随着业务的逐渐融合和部署场景的不断扩展，地面蜂窝网与包括高轨卫星网络、中低轨卫星网络、高空平台、无人机在内的空间网络相互融合，将构建起全球广域覆盖的空天地一体化三维立体网络，为用户提供无盲区的宽带移动通信服务。

全域覆盖将实现全时全地域的宽带接入能力，为偏远地区、飞机、无人机、汽车、轮船等提供宽带接入服务；为全球没有地面网络覆盖的地区提供广域物联网接入，保障应急通信、农作物监控、珍稀动物无人区监控、海上浮标信息收集、远洋集装箱信息收集等服务；提供精度为厘米级的高精度定位，实现高精度导航、精准农业等服务；此外，通过高精度地球表面成像，可实现应急救援、交通调度等服务。



图9 全域覆盖：无缝立体的超级连接

为满足未来6G更加丰富的业务应用以及极致的性能需求，需要在探索新型网络架构的基础上，在关键核心技术领域实现突破。当前，全球业界对6G关键技术仍在探索中，提出了一些潜在的关键技术方向以及新型网络技术。

（一）内生智能的新型网络

未来，人工智能技术将内生于未来移动通信系统并通过无线架构、无线数据、无线算法和无线应用等呈现出新的智能网络技术体系。AI技术在6G网络中是原生的，从6G网络设计之初就考虑对AI技术的支持，而不只是将AI作为优化工具。总体上，可以从两个不同角度来看待无线AI在6G时代的发展方向，即内生智能的新型空口和内生智能的新型网络架构。

1. 内生智能的新型空口

内生智能的新型空口，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。

内生智能的新型空口技术可以通过端到端的学习来增强数据平面和控制信令的连通性、效率和可靠性，允许针对特定场景在深

度感知和预测的基础上进行定制，且空口技术的组成模块可以灵活地进行拼接，以满足各种应用场景的不同要求。AI技术的学习、预测和决策能力使通信系统能够根据流量和用户行为主动调整无线传输格式和通信动作，可以优化并降低通信收发两端的功耗。借助多智能体等AI方法，可以使通信参与者之间高效协同，最大化比特传输的能效。

利用数据和深度神经网络的黑盒建模能力可以从无线数据中挖掘并重构未知的物理信道，从而设计最优的传输方式。在多用户系统中，通过强化学习，基站与用户可自动根据所接收到的信号协调信道接入、资源调度等。每个节点可计算每次传输的反馈，以调整其发射功率、波束方向等信号方案，从而达到协同消除干扰、最大化系统容量的目的。

此外，随着机器学习以及信息论的交叉融合和进一步发展，语义通信也将成为内生智能的新型空口技术的终极目标之一。通信系统不再只关注比特数据的传输，更重要的是，信息可以根据其含义进行交换，而同一信息的含义对于不同的用户、应用和场景可能有所不同。无线数据的高效感知获取、数据私密性的保证是人工智能赋能空口设计的关键难点。

2. 内生智能的新型网络架构

内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，使得6G网络原生支持各类AI应用，构建新的生态和以用户为中心的业务体验。

借助内生智能，6G网络可以更好地支持无处不在的具有感知、通信和计算能力的基站和终端，实现大规模智能分布式协同服务，同时最大化网络中通信与算力的效用，适配数据的分布性并保护数据的隐私性。这带来三个趋势的转变：智能从应用和云端走向网络，即从传统的Cloud AI向Network AI转变，实现网络的自运维、自检测和自修复；智能在云-边-端-网间协同实现包括频谱、计算、存储等多维资源的智能适配、提升网络总体效能；智能在网络中对外提供服务，深入融合行业智慧，创造新的市场价值。当前，网络内生智能在物联网、移动边缘计算、分布式计算、分布式控制等领域具有明确需求并成为研究热点。

网络内生智能的实现需要体积更小、算力更强的芯片，如纳米光子芯片等技术的发展；需要更适用于网络协同场景下的联邦学习等算法；需要网络和终端设备提供新的接口实现各层智能的产生和交换。

（二）增强型无线空口技术

1. 无线空口物理层基础技术

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/时延/性能的需求，需要对空口物理层基础技术进行针对性的设计。

在调制编码技术方面，需要形成统一的编译码架构，并兼顾多元化通信场景需求。

例如，极化（Polar）码在非常宽的码长/码率取值区间内都具有均衡且优异的性能，通过简洁统一的码构造描述和编译码实现，可获得稳定可靠的性能。极化码和准循环低密度奇偶校验（LDPC）码都具有很高的译码效率和并行性，适合高吞吐量业务需求。

在新波形技术方面，需要采用不同的波形方案设计来满足6G更加复杂多变的应用场景及性能需求。例如，对于高速移动场景，可以采用能够更加精确刻画时延、多普勒等维度信息的变换域波形；对于高吞吐量场景，可以采用超奈奎斯特采样（FTN）、高谱效频分复用（SEFFM）和重叠X域复用（OVXDM）等超奈奎斯特系统来实现更高的频谱效率。

在多址接入技术方面，为满足未来6G网络在密集场景下低成本、高可靠和低时延的接入需求，非正交多址接入技术将成为研究热点，并将会从信号结构和接入流程等方面进行改进和优化。通过优化信号结构，提升系统最大可承载用户数，并降低接入开销，满足6G密集场景下低成本高质量的接入需求。通过接入流程的增强，可满足6G全业务场景、全类型终端的接入需求。

2. 超大规模MIMO技术

超大规模MIMO技术是大规模MIMO技术的进一步演进升级。天线和芯片集成度的不断提升将推动天线阵列规模的持续增大，通过应用新材料，引入新的技术和功能（如超大规模口径阵列、可重构智能表面（RIS）、人工智能和感知技术等），超大规模MIMO技术可以在更加多样的频率范围

内实现更高的频谱效率、更广更灵活的网络覆盖、更高的定位精度和更高的能量效率。

超大规模MIMO具备在三维空间内进行波束调整的能力，除地面覆盖之外，还可以提供非地面覆盖，如覆盖无人机、民航客机甚至低轨卫星等。随着新材料技术的发展，以及天线形态、布局方式的演进，超大规模MIMO将与环境更好地融合，进而实现网络覆盖、多用户容量等指标的大幅度提高。分布式超大规模MIMO有利于构造超大规模的天线阵列，网络架构趋近于无定形网络，有利于实现均匀一致的用户体验，获得更高的频谱效率，降低系统的传输能耗。

此外，超大规模MIMO阵列具有极高的空间分辨能力，可以在复杂的无线通信环境中提高定位精度，实现精准的三维定位；超大规模MIMO的超高处理增益可有效补偿高频段的路径损耗，能够在不增加发射功率的条件下提升高频段的通信距离和覆盖范围；引入人工智能的超大规模MIMO技术有助于在信道探测、波束管理、用户检测等多个环节实现智能化。

超大规模MIMO所面临的挑战主要包括成本高、信道测量与建模难度大、信号处理运算量大、参考信号开销大和前传容量压力大等问题，此外，低功耗、低成本、高集成度天线阵列及射频芯片是超大规模MIMO技术实现商业化应用的关键。

3. 带内全双工技术

带内全双工技术通过在相同的载波频率上，同时发射、同时接收电磁波信号，

与传统的FDD、TDD等双工方式相比，不仅可以有效提升系统频谱效率，还可以实现传输资源更加灵活的配置。

全双工技术的核心是自干扰抑制，从技术产业成熟度来看，小功率、小规模天线单站全双工已经具备实用化的基础，中继和回传场景的全双工设备已有部分应用，但大规模天线基站全双工组网中的站间干扰抑制、大规模天线自干扰抑制技术还有待突破。在部件器件方面，小型化高隔离度收发天线的突破将会显著提升自干扰抑制能力，射频域自干扰抑制需要的大范围可调时延芯片的实现会促进大功率自干扰抑制的研究。在信号处理方面，大规模天线功放非线性分量的抑制是目前数字域干扰消除技术的难点，信道环境快速变化情况下射频域自干扰抵消的收敛时间和鲁棒性也会影响整个链路的性能。

（三）新物理维度无线传输技术

除传统的增强无线空口技术外，业界也在积极探索新的物理维度，以实现信息传输方式的革命性突破，如智能超表面技术、轨道角动量技术和智能全息无线电技术等。

1. 智能超表面技术

智能超表面技术（RIS）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。智能超表面技术通过对无线传播环境的主动控制，在三维空间中实现信号传播方向调控、信号增强或干

扰抑制，构建智能可编程无线环境新范式，可应用于高频覆盖增强、克服局部空洞、提升小区边缘用户速率、绿色通信、辅助电磁环境感知和高精度定位等场景。

智能超表面技术用于通信系统中的覆盖增强，可显著提升网络传输速率、信号覆盖以及能量效率。通过对无线传播环境的主动定制，可根据所需无线功能，如减小电磁污染和辅助定位感知等，对无线信号进行灵活调控。智能超表面技术无需传统结构发射机中的滤波器、混频器以及功率放大器组成的射频链路，可降低硬件复杂度、成本和能耗。

智能超表面技术所面临的挑战和难点主要包括超表面材料物理模型与设计、信道建模、信道状态信息获取、波束赋型设计、被动信息传输和AI使能设计等。

2. 轨道角动量

轨道角动量（OAM）是电磁波固有物理量，同时也是无线传输的新维度，是当前6G潜在关键技术之一。利用不同模态OAM电磁波的正交特性可大幅提升系统频谱效率。具有OAM的电磁波又称“涡旋电磁波”，其相位面呈现螺旋状，不是传统的平面相位电磁波。涡旋电磁波分为由天线发射的经典电磁波波束和用回旋电子直接激发的电磁波量子态。

OAM电磁波波束是一种空间结构化波束，可以看成是一种新型MIMO波束赋形方式，可由均匀圆形天线阵、螺旋相位板和特殊反射面天线等特定天线产生，不同OAM模态的波束具有相互正交的螺旋相位面。在

点对点直射传输时，与传统MIMO波束相比可大幅降低波束赋形和相应数字信号处理的复杂度。OAM波束传输最大的难点源于其倒锥状发散波束，使OAM波束在长距离传输和波束对准等方面面临挑战。随着工作频点和带宽的进一步提高，器件工艺、天线设计、射频信号处理等是未来商用需要克服的关键技术难点。

OAM量子态要求光量子或微波量子具有轨道角动量，目前发射和接收无法采用传统天线完成，需要特殊的发射接收装置。目前OAM量子态的研究主要集中在OAM电磁波量子的高效激发、传输、接收、耦合、模态分选等具体方法，以及设备小型化等领域。

3. 智能全息无线电技术

智能全息无线电(IHR)是利用电磁波的全息干涉原理实现电磁空间的动态重构和实时精密调控，将实现从射频全息到光学全息的映射，通过射频空间谱全息和全息空间波场合成技术实现超高分辨率空间复用，可满足超高频谱效率、超高流量密度和超高容量需求。

智能全息无线电具有超高分辨率的空间复用能力，主要应用场景包括超高容量和超低时延无线接入、智能工厂环境下超高流量密度无线工业总线、海量物联网设备的高精度定位和精准无线供电以及数据传输等。此外，智能全息无线电通过成像、感知和无线通信的融合，可精确感知复杂电磁环境，支撑未来电磁空间的智能化。

智能全息无线电基于微波光子天线阵列的相干光上变频，可实现信号的超高相干性和高并行性，有利于信号直接在光域进行处理和计算，解决智能全息无线电系统的功耗和时延挑战。

智能全息无线电在射频全息成像和感知等领域已有一定程度的研究，但在无线通信领域的应用仍面临许多挑战和难点，主要包括智能全息无线电通信理论和模型的建立；基于微波光子技术的连续孔径有源天线阵与高性能光计算之间的高效协同、透明融合和无缝集成等硬件及物理层设计相关等问题。

（四）太赫兹与可见光通信技术

1. 太赫兹通信技术

太赫兹频段（0.1~10THz）位于微波与光波之间，频谱资源极为丰富，具有传输速率高、抗干扰能力强和易于实现通信探测一体化等特点，重点满足Tbps量级大容量、超高传输速率的系统需求。

太赫兹通信可作为现有空口传输方式的有益补充，将主要应用在全息通信、微小尺寸通信（片间通信及纳米通信）、超大容量数据回传、短距超高速传输等潜在应用场景。同时，借助太赫兹通信信号进行高精度定位和高分辨率感知也是重要应用方向。

太赫兹通信需要解决的关键核心技术及难点主要包括以下几个方面。收发架构设计方面，目前太赫兹通信系统有三类典型的收发架构，包括基于全固态混频调

制的太赫兹系统、基于直接调制的太赫兹系统和基于光电结合的太赫兹系统，小型化、低成本、高效率的太赫兹收发架构是亟待解决的技术问题。射频器件方面，太赫兹通信系统中的主要射频器件包括太赫兹变频电路、太赫兹混频器、太赫兹倍频器和太赫兹放大器等。当前太赫兹器件的工作频点和输出功率仍然难以满足低功耗、高效率、长寿命等商用需求，需要探索基于锗化硅、磷化铟等新型半导体材料的射频器件。基带信号处理方面，太赫兹通信系统需要实时处理Tbps量级的传输速率，突破低复杂度、低功耗的先进高速基带信号处理技术是太赫兹商用的前提。太赫兹天线方面，目前高增益天线主要采用大尺寸的反射面天线，需要突破小型化和阵列化的太赫兹超大规模天线技术。此外，为了实现信道表征和度量，还需要针对太赫兹通信不同场景进行信道测量与建模，建立精确实用化的信道模型。

2. 可见光通信技术

可见光通信指利用从400THz到800THz的超宽频谱的高速通信方式，具有无需授权、高保密、绿色和无电磁辐射的特点。

可见光通信比较适合于室内的应用场景，可作为室内网络覆盖的有效补充，此外，也可应用于水下通信、空间通信等特殊场景以及医院、加油站、地下矿场等电磁敏感场景。

当前大部分无线通信中的调制编码方式、复用方式、信号处理技术等都可应用

于可见光通信来提升系统性能，可见光通信的主要难点在于研发高带宽的LED器件和材料，虽然可见光频段有极其丰富的频谱资源，但受限于光电、电光器件的响应性能，实际可用的带宽很小，如何提高发射、接收器件的响应频率和带宽是实现高速可见光通信必须解决的难题。此外，上行链路也是可见光通信面临的重要挑战，通过与其他通信方式的异构融合组网是解决可见光通信上行链路的一种方案。

（五）通信感知一体化

通信感知一体化是6G潜在关键技术的研究热点之一，其设计理念是要让无线通信和无线感知两个独立的功能在同一系统中实现且互惠互利。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。

在未来通信系统中，更高的频段（毫米波、太赫兹甚至可见光）、更宽的频带带宽，以及更大的天线孔径将成为可能，这些将为在通信系统中集成无线感知能力提供可能。通过收集和分析经过散射、反射的通信信号获得环境物体的形态、材质、远近和移动性等基本特性，利用经典算法或AI算法，实现定位、成像等不同功能。

虽然天线等系统部件可以实现共用，但由于通信和感知的目的不同，通信与感知一体化

设计还有很多技术挑战，主要包括通感一体化信号波形设计、信号及数据处理算法、定位和感知联合设计，以及感知辅助通信等。此外，可集成的便携式通感一体终端设计也是一个重要方向。

（六）分布式自治网络架构

6G网络将是具有巨大规模、提供极致网络体验和支持多样化场景接入，实现面向全场景的泛在网络。为此，需开展包括接入网和核心网在内的6G网络体系架构研究。对于接入网，应设计旨在减少处理延迟的至简架构和按需能力的柔性架构，研究需求驱动的智能控制机制及无线资源管理，引入软件化、服务化的设计理念。对于核心网，需要研究分布式、去中心化、自治化的网络机制来实现灵活、普适的组网。

分布式自治的网络架构涉及多方面的关键技术，包括：去中心化和以用户为中心的控制和管理；深度边缘节点及组网技术；需求驱动的轻量化接入网架构设计、智能控制机制及无线资源管理；网络运营与业务运营解耦；网络、计算和存储等网络资源的动态共享和部署；支持任务为中心的智能连接，具备自生长、自演进能力的智能内生架构；支持具有隐私保护、可靠、高吞吐量区块链的架构设计；可信的数据治理等。

网络的自治和自动化能力的提升将有

赖于新的技术理念，如数字孪生技术在网络中的应用。传统的网络优化和创新往往需要在真实的网络上直接尝试，耗时长、影响大。基于数字孪生的理念，网络将进一步向着更全面的可视、更精细的仿真和预测、更智能的控制发展。数字孪生网络（DTN）是一个具有物理网络实体及虚拟孪生体，且二者可进行实时交互映射的网络系统。孪生网络通过闭环的仿真和优化来实现对物理网络的映射和管控。这其中，网络数据的有效利用、网络的高效建模等是亟需攻克的问题。

网络架构的变革牵一发而动全身，需要在考虑新技术元素如何引入的同时，也要考虑与现有网络的共存共生问题。

（七）确定性网络

新一代信息技术与工业现场级操作技术的融合促使移动通信网络向“确定性网络”演进。工业制造、车联网、智能电网等时延敏感类业务的发展，对网络性能提出了确定性需求，包括：端到端的及时交付，即确定的最小和最大延迟以及延迟抖动；各种运行状态下有界的丢包率；数据交付时有上限的乱序等。

确定性的能力涉及端到端无线接入网、核心网和传输网络的系统性优化，涉及资源的分配、保护、测量、协同四个方面。在资源分配机制方面，沿着数据流经过的路径逐跳分配资源，包括网络中的缓

存空间或链路带宽等，消除网络内数据包争用而导致的丢包；通过预调度、优化调度流程，减少调度时延和开销。在服务保护机制方面，包括研究数据包编码解决随机介质错误造成的丢包，设计数据包复制和消除机制防止设备故障，空口在移动、干扰、漫游时的服务保护方法等。在QoS度量体系方面，增加QoS定义的维度，包括吞吐量、时延、抖动、丢包率、乱序上限等，研究多维度QoS的评测方法，建立精准的度量体系。在多网络跨域协同方面，研究跨空口、核心网、传输网、边界云、数据中心等多域融合的控制方法和确定性达成技术。

确定性网络的应用在克服多方面极具挑战的技术之外，如何高效低成本的实现确定性网络、降低高精度带来高成本是决定其产业化推广需解决的问题。

（八）算力感知网络

为了满足未来网络新型业务以及计算轻量化、动态化的需求，网络和计算的融合已经成为新的发展趋势。业界提出了算力感知网络（或简称算力网络）的理念：将云边端多样的算力通过网络化的方式连接与协同，实现计算与网络的深度融合及协同感知，达到算力服务的按需调度和高效共享。

在6G时代，网络不再是单纯的数据传输，而是集通信、计算、存储为一体的信息系统。算力资源的统一建模度量是算力调度

的基础，算力网络中的算力资源将是泛在化、异构化的，通过模型函数将不同类型的算力资源映射到统一的量纲维度，形成业务层可理解、可阅读的零散算力资源池，为算力网络的资源匹配调度提供基础保障。统一的管控体系是关键，传统信息系统中应用、终端、网络相互独立，缺乏统一的架构体系进行集中管控、协同，因此算力网络的管控系统将由网络进一步向端侧延伸，通过网络层对应用层业务感知，建立端边云融合一体的新型网络架构，实现算力资源的无差别交付、自动化匹配，以及网络的智能化调度，并解决算力网络中多方协作关系和运营模式等问题。

目前，产业界正从算网分治向算网协同转变，并将向算网一体发展。这需要兼顾从云到网和从网到云的应用层与网络层发展的结合，以及相应的中心化和分布式控制的协同。

（九）星地一体融合组网

6G将实现地面网络、不同轨道高度上的卫星（高中低轨卫星）以及不同空域飞行器融合而成全新的移动信息网络，通过地面网络实现城市热点常态化覆盖，利用天基、空基网络实现偏远地区、海上和空中按需覆盖，具有组网灵活、韧性抗毁等突出优势。星地一体的融合组网将不是卫星、飞行器与地面网络的简单互联，而是空基、天基、地基网络的深度融合，构

建包含统一终端、统一空口协议和组网协议的服务化网络架构，在任何地点、任何时间、以任何方式提供信息服务，实现满足天基、空基、地基等各类用户统一终端设备的接入与应用。

6G时代的星地一体融合组网，将通过开展星地多维立体组网架构、多维多链路复杂环境下融合空口传输技术、星地协同的移动协议处理、天基高性能在轨计算、星载移动基站处理载荷、星间高速激光通信等关键技术的研究，解决多层卫星、高空平台、地面基站构成的多维立体网络的融合接入、协同覆盖、协调用频、一体化传输和统一服务等问题。由于非地面网络的网络拓扑结构动态变化以及运行环境的不同，地面网络所采用的组网技术不能直接应用于非地面场景，需研究空天地一体化网络中的新型组网技术，如命名/寻址、路由与传输、网元动态部署、移动性管理等，以及地面网络与非地面网络之间的互操作等。

星地一体融合网络需要拉通卫星通信与移动通信两个领域，涉及移动通信设备、卫星设备、终端芯片等，既有技术也有产业的挑战。此外卫星在能源、计算等资源方面的限制也对架构和技术选择提出了更高的要求，需要综合考虑。

（十）支持多模信任的网络内生安全

信息通信技术与数据技术、工业操作

技术融合、边缘化和设施的虚拟化将导致6G网络安全边界更加模糊，传统的安全信任模型已经不能满足6G安全的需求，需要支持中心化的、第三方背书的以及去中心化的多种信任模式共存。

未来的6G网络架构将更趋于分布式，网络服务能力贴近用户端提供，这将改变单纯中心式的安全架构；感知通信、全息感知等全新的业务体验，以用户为中心提供独具特色的服务，要求提供多模、跨域的安全可信体系，传统的“外挂式”、“补丁式”网络安全机制对抗未来6G网络潜在的攻击与安全隐忧更具挑战。人工智能、大数据与6G网络的深度融合，也使得数据的隐私保护面临着前所未有的新挑战。新型传输技术和计算技术的发展，将牵引通信密码应用技术、智能韧性防御体系，以及安全管理架构向具有自主防御能力的内生安全架构演进。

6G的安全架构应奠定在一个更具包容性的信任模型基础之上，具备韧性且覆盖6G网络全生命周期，内生承载更健壮、更

智慧、可扩展的安全机制，涉及多个安全技术方向。融合计算机网络、移动通信网络、卫星通信网络的6G安全体系架构及关键技术，支持安全内生、安全动态赋能；终端、边缘计算、云计算和6G网络间的安全协同关键技术，支持异构融合网络的集中式、去中心化和第三方信任模式并存的多模信任架构；贴合6G无线通信特色的密码应用技术和密钥管理体系，如量子安全密码技术、逼近香农一次一密和密钥安全分发技术等；大规模数据流转的监测与隐私计算的理论与关键技术，高通量、高并发的数据加解密与签名验证，高吞吐量、易扩展、易管理，且具备安全隐私保障的区块链基础能力；拓扑高动态和信息广域共享的访问控制模型与机制，以及隔离与交换关键技术。

将安全架构与网络架构的迭代进行一体化设计是关键。通信网安全需兼顾通信和安全，在代价和收益之间做出平衡，同时以“安全防护无止境”为始终，从攻防对抗视角动态度量通信网安全状态，结合区块链等技术的引入不断演进。

（一）5G成功商用将为6G演进奠定坚实基础

全球移动通信发展历经1G到4G的跨越式发展，已进入5G商用的关键阶段。回顾移动通信发展历程，新业务应用由出现到成熟往往需要两代周期来培育，1G实现了语音业务，在2G获得了广泛应用；3G开始可以支持移动多媒体业务，到4G时代移动互联网业务得到了蓬勃发展；5G应用场景首次由移动互联网拓展到物联网领域，将实现与垂直行业的深度融合，开启了工业互联网新时代。

在信息消费极大增长和生产效率不断提升的需求驱动下，以及在先进的感知技术、人工智能、通信技术、新材料和新器件的使能下，将衍生出更高层次的移动通信新需求，推动5G向6G演进和发展。6G将在5G基础上进一步拓展和深化物联网的应用范围和领域，持续提升现有网络的基础能力，并不断发掘新的业务应用，服务于智能化社会和生活，实现由万物互联到万物智联的跃迁。5G的成功商用，特别是在垂直行业领域的广泛应用，将为6G发展奠定良好基础。预计3GPP国际标准组织将于2025年后启动6G国际技术标准研制，大约在2030年实现6G商用。

（二）智赋万物、智慧内生成成为6G重要特征

移动通信技术与人工智能、大数据、云计算等新一代网络信息技术加速融合，智能化将成为未来新一代移动通信技术发展的新趋势之一。DOICT的深度融合将激发新一代网络信息技术创新活力，释放多技术交叉融合运用所带来的叠加倍增效应，带来感知、存储、计算、传输等环节的群体性突破，最终实现网络信息技术的代际跃迁。同时，人工智能将推动网络进入智能化时代，人工智能技术在网络领域正在从辅助运维扩展到网络性能优化、网络模式分析、部署管理、网络架构创新等多个领域，将引发网络信息技术的全方位创新。

在此背景下，6G将使超大规模的智能化网络成为现实，在物理世界中运行的个人、设备、特定环境将通过动态数字建模在智能化网络中找到位置。6G网络连接起来的智能体，通过不断的学习、交流、合作和竞争，将能够以超高效率模拟和预测物理世界的运行和发展，从而做出更快、更好的决策。

（三）高中低全频段高效利用满足6G频谱需求

频谱资源是移动通信发展的基础，6G将持续开发优质可利用频谱，在对现有频

谱资源高效利用的基础上，进一步向毫米波、太赫兹、可见光等更高频段扩展，通过对不同频段频谱资源的综合高效利用来满足6G不同层次的发展需求。

6GHz及其以下频段的新频谱仍然是6G发展的战略性资源，通过重耕、聚合、共享等手段，进一步提升频谱使用效率，将为6G提供最基本的地面连续覆盖，支持6G实现快速、低成本网络部署。

高频段将满足6G对超高速率、超大容量的频谱需求。随着产业的不断发展和成熟，毫米波频段在6G时代将发挥更大作用，其性能和使用效率将大幅提升。太赫兹、可见光等更高频段，受传播特性限制，将重点满足特定场景的短距离大容量需求，这些高频段也将在感知通信一体化、人体域连接等场景发挥重要作用。

（四）卫星等助力蜂窝地面网络实现6G全域覆盖

6G将进一步扩展网络覆盖的广度和深度，实现全球无缝覆盖。卫星、无人机等非地面设施能够实现更广覆盖，为轮船、飞机、广域物联网及移动互联网终端提供通信

及联网服务，但由于其覆盖范围极广，导致其单位面积容量低，难以满足密集城区用户的大容量需求。此外，与地面之间的距离远，传输时延较长，也难以满足超低时延垂直行业应用的需求。地面蜂窝移动通信的优势在于其强大的计算能力、大数据存储能力、高数据传输速率、低时延以及支持海量连接，可有效满足人口密集地区的大容量网络需求，但其覆盖范围受限。现有的地面蜂窝网络仅覆盖地球表面的10%，在人口密度低、回报价值低的偏远地区网络部署成本高昂、性价比低，且易受地形和地质灾害影响。因此，在未来6G网络中，卫星等非地面通信将作为地面蜂窝网络的补充，推动形成无缝全域覆盖的通信网络。

未来空天地海一体化覆盖网络将由具备不同功能、位于不同高度的卫星、高空平台、近地通信平台以及陆地和海洋等多种网络节点实现互联互通，相互取长补短、优势互补，形成一个以地面蜂窝网络为基础，多种非地面通信为重要补充的立体广域覆盖通信网络，实现同一终端在地面、空中、海面各个区域之间的无缝漫游，为各类用户提供多样化的应用和服务。

缩略语简表

英文缩写	英文全称	中文解释
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AR	Augmented Reality	增强现实
DOICT	The Convergence of DT, OT, IT, and CT	数字、运营、信息、通信技术融合
DTN	Digital Twin Network	数字孪生网络
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FTN	Faster-Than-Nyquist	超奈奎斯特采样
IHR	Intelligent Holographic Radio	智能全息无线电
IoT	Internet of Things	物联网
LDPC	Low Density Parity Check	低密度奇偶校验
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多输入多输出
MR	Mixed Reality	混合现实
MTP	Motion-To-Photons	头动响应
OAM	Orbital Angular Momentum	轨道角动量
OVXDM	Overlapped X-domain Multiplexing	重叠X域复用
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰均功率比
PPD	Pixels Per Degree	像素每度
QoS	Quality of Service	服务质量

英文缩写	英文全称	中文解释
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	可重构智能表面
SEFFM	Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing	高谱效频分复用
TCA	Tight-Coupling Antenna	紧耦合天线阵列
TDD	Time Division Duplex	时分双工
UCA	Uniform Circular Array	均匀圆形天线阵
uHDD	Ultra High Data Density	超高数据密度
UTC-PD	Uni-Traveling-Carrier Photodiode	单行载流子光电探测器
VR	Virtual Reality	虚拟现实
XR	Extended Reality	扩展现实

参考资料

[1].Kharas, H., Gertz, G. The New Global Middle Class: A Cross-Over from West to East[J]. Washington, 2010, 1-14.

[2].United Nation. World Population Prospects 2019: Highlight[R]. 2019, New York.

[3].Xuewu Xu, Yuechao Pan, Phyu Mar Yi Lwin, and Xinan Liang, 3D Holographic Display and Its Data Transmission Requirement

[4].Chen X , Zhou M , Wang R. Evaluating Response Delay of Multimodal Interface in Smart Device[C], International Conference on Human-Computer Interaction. Springer, Cham, 2019.

[5].Mugellini E , Lalanne D , Dumas B , et al. Human Machine Interaction[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[6].王凌豪,王淼,张亚文,张玉军.未来网络应用场景与网络能力需求[J].电信科学,2019,35(10):2-12.

[7].GSMA, The State of Mobile Internet Connectivity 2020

主要贡献单位







微信公众号

联系方式
邮箱: imt2030@caict.ac.cn

COPYRIGHT © 2021 IMT-2030 (6G) PROMOTION GROUP.
ALL RIGHTS RESERVED.