

6G 愿景及潜在关键技术分析

徐晓燕 韩凯峰 杜滢 刘慧 赵妍

- (1. 中国信息通信研究院移动通信创新中心, 北京 100191;
2. 中国信息通信研究院国际合作部, 北京 100191)

摘要: 继 5G 规模商用之后, 世界主要国家和地区均已启动 6G 研发布局, 抢夺下一代移动通信发展主导权。目前业界正在热烈探讨 6G 愿景需求及关键技术, 但尚未形成最终结论。阐述了未来 6G 可能提供的五大典型场景、预期具备的主要技术能力指标, 以及支撑典型场景和能力指标实现需要重点考虑的关键技术方向。重点针对人工智能与无线通信的融合、感知通信融合、智能超表面、太赫兹通信技术、无线网络架构等业界重点关注的创新型潜在技术进行了分析, 提出未来的研究方向供业界参考。

关键词: 6G; 典型场景; 主要技术指标; 人工智能与无线通信的融合; 感知通信融合; 智能超表面等; 太赫兹通信; 无线网络架构

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

引用格式: 徐晓燕, 韩凯峰, 杜滢, 等. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. 信息通信技术与政策, 2022, 48(9): 2-8.

DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2022.09.001

0 引言

面向 2030 年及未来, 人类社会将进入智能化时代。社会服务均衡化、高端化, 社会治理科学化、精准化, 社会发展绿色化、节能化将成为未来社会的发展趋势^[1]。移动通信的代际跃迁不仅深刻变革了人们的生活方式, 更将成为社会经济数字化和信息化水平加速提升的新引擎。

当前, 全球主要国家已启动了面向新一代移动通信系统(6G)的研究, 业界正在积极探索未来 IMT 系统的应用场景和主要性能指标, 并开展潜在关键技术预研。国际电信联盟无线电通信部门 5G 工作组(ITU-R WP5D)在 2022 年 6 月份第 41 次会议期间完成了《未来技术趋势研究报告》^[2], 并计划将于 2023 年 6 月完成《未来 IMT 愿景需求建议书》^[3]。

本文结合当前国内外研究进展, 在 6G 总体愿景的基础上, 重点提出了未来 6G 典型应用场景和主要能力指标, 并对业界重点关注的创新型潜在关键技术进行了分析。

1 6G 总体愿景

面向 2030 年及未来, 在社会宏观发展进步、经济高质量提升以及环境可持续发展等因素的共同驱动下, 人类社会将进入智能化时代, 全新的场景及应用需求将极大拓展移动通信网络服务的能力边界, 6G 将有效服务智能化生产与生活, 助力构建智能普惠的人类社会。6G 将与人工智能、大数据、云计算等新一代网络信息技术加速融合; 将充分利用低中高全频谱资源, 满足不同场景及业务应用需求; 将实现空天地一体化的全球无缝立体覆盖, 随时随地满足安全可靠的“人机

物”无限连接需求。6G 将为沉浸式云 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、精密机器控制等 5G 网络难以实现的全新业务应用提供能力支撑,助力实现真实环境中物理实体的数字化和智能化,并渗透至生产生活及社会治理的方方面面,实现世间万物“万物智联、数字孪生”的总体愿景^[1]。

2 6G 的 5 个典型场景

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,预计面向 2030 年及以后的 6G 将在三大典型场景基础上不断扩展(见图 1)。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^[4]。

面向 2030 年及以后 6G 的典型场景描述如下。

2.1 超级无线宽带

超级无线宽带将是 5G 增强型移动宽带(Enhanced 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社会效率。

以人为中心的通信(如沉浸式 XR、通感互连、全息通信和远程操控)以及以机器为中心的通信(如视频监测控制和工业机器人触觉反馈等)在热点部署的场景下将对峰值速率、用户体验速率、系统容量提出更高的要求。同时,还需要时延的降低和稳定性的提升以获得更好的用户体验。全域覆盖意味着全时全地域的宽带接入能力,在空天地一体化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。此外,超级移动宽带也需要提供更高的频谱效率,在移动高清视频直播、飞机、轮船或高铁等高移动性场景下保证高质量的用户体验。

2.2 极其可靠通信

极其可靠通信将在 5G 低时延高可靠通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications, 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。

除了要求更低的时延和更高的可靠性之外,也将新增抖动等确定性要求。此外,某些情景下还需要同时具备高速数据传输和超高精度定位的能力。

2.3 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

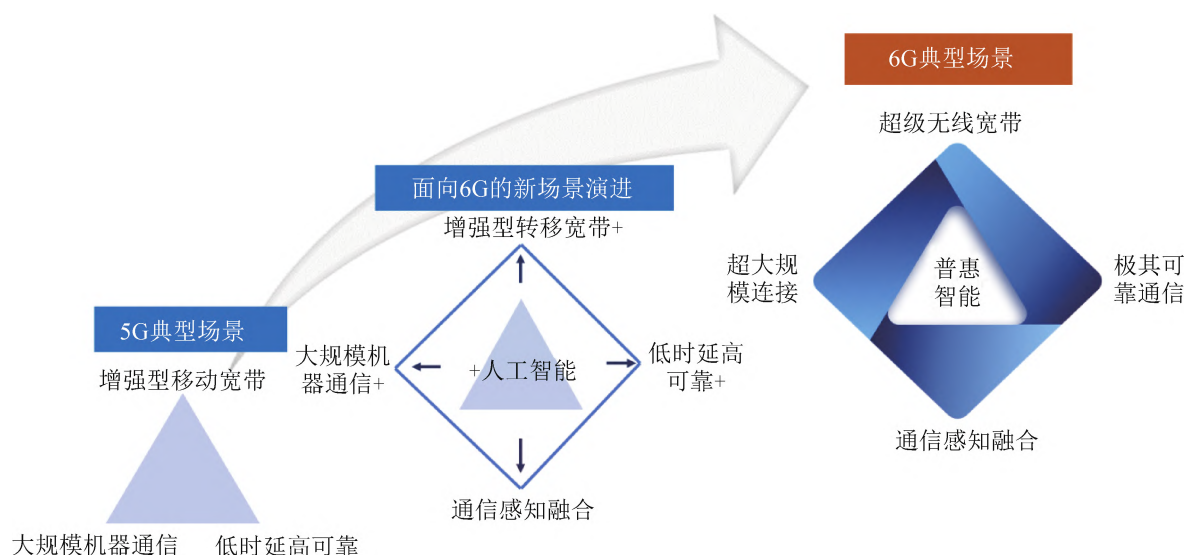


图1 从5G到6G的典型场景演进

基础上,拓展新的应用领域和能力边界。超大规模连接的对象将包括智慧城市、智慧生活、智慧交通、智慧农业和智能制造中部署的各类设备。典型应用有远程抄表、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,通过日常生活中的各类设备采集并传送丰富信息,数字孪生城市将广泛具备海量数据采集、高精度图像构建、高清视频监控的应用。

超大规模连接的场景特点是连网设备数量巨大,但多数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可能从低到高不等。数据包的传递频次根据具体应用也存在较大差异,从一天一次到几毫秒一次。不同采集能力的传感器,其寿命也会存在较大差异。同时,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。

2.4 普惠智能服务

普惠智能服务是6G的新增典型场景,通过网络为需要进行高效分布式AI学习或推理的智能化服务提供集成化的通信和AI计算能力。它不仅将服务于特定应用,还将服务于未来整个通信系统,以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(包括设备中)的智能算力,使社会各个角落享受到快捷和灵活的智能服务。此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积累。

普惠智能服务以提供AI学习和推理为目标,除了通信方面的大容量和低时延要求外,此场景还需要一组与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此场景的重要条件。

2.5 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成像、制图和定位等超越传统通信的能力,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,如(范围、速度、角度)的感知分辨率和感知精度、检测概率、高精度定位等,其要求因应用而异。对于定位和重建功能,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,检测概率是首要因素。

综上所述,未来6G的5个典型场景及其特征性业务如图2所示。

3 主要能力指标

为了支撑并实现未来6G的五大场景,未来IMT系统的主要能力指标可以看作是在5G指标体系基础上的进一步增强和扩充。6G能力既有传统通信性能指标方面的提升,提供更高速率、更多连接、更低时延、更高精度、更广覆盖、更高可靠性,也有在传统移动通信基础能力之外新增添的感知和人工智能等新的能力维度,以支持通信感知融合和普惠智能这两个新典型场景的应用需求。考虑到我国ICT技术赋能减排,预计2040年6G网络的能量效率相比2022年移动通信网络需提升约20倍^[4]。在网络建设维护成本和安全方面,也将有更高的要求。

6G的主要指标体系,可看作由可量化指标(如峰值速率、用户体验速率、频谱效率、连接数密度、区域流量密度、覆盖范围、移动性、时延和抖动、可靠性、能量效率、AI能力相关指标、感知/定位能力相关指标等),和非量化指标(如成本控制、可信度等)共同构成。

6G可量化指标的初步考虑以及与5个典型场景的对应关系如图3所示。

在非量化指标方面,信息技术的跨界融合和服务场景多样化对网络安全提出新的挑战,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。此外,构建低成本的柔性、至简、孪生自治网络是6G网络建设的目标^[5],6G研发的过程中需要考虑网络的建设成本、运营成本和维护成本,把



图2 6G五大典型场景

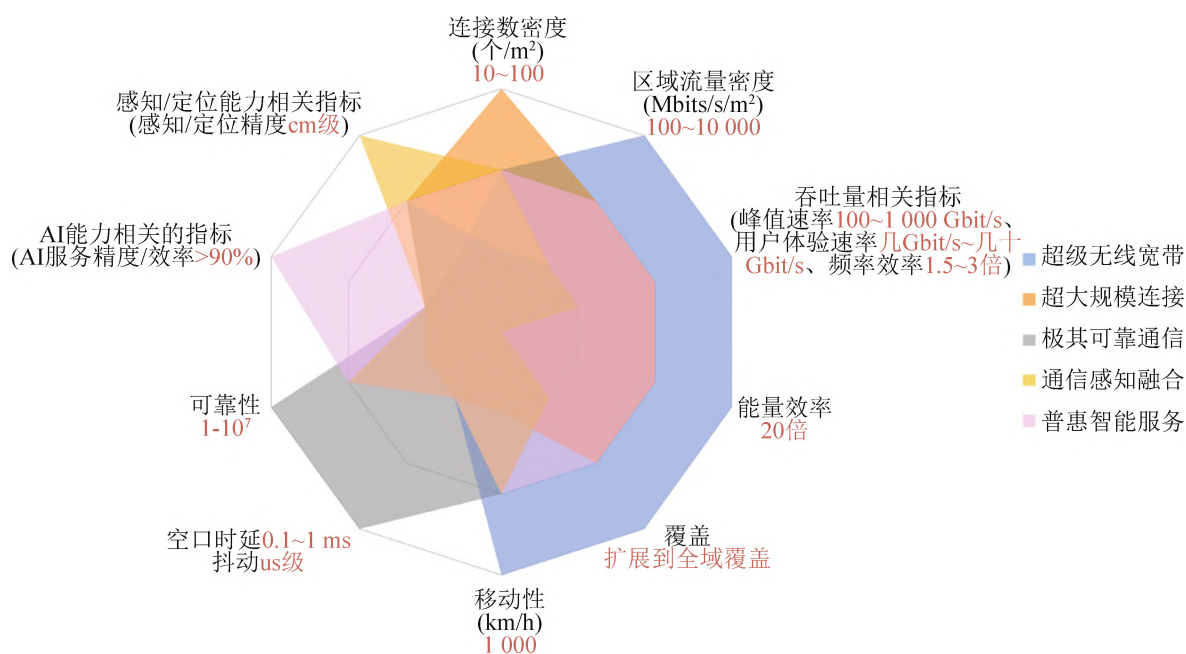


图3 6G可量化指标取值范围与典型场景的对应关系

低成本也作为设计目标之一。

4 6G 主要关键技术举例

为满足面向 2030 年未来 6G 网络性能需求,需要传统无线空口技术的持续演进以及新技术维度的突破。从 2022 年 6 月 ITU 完成的未来技术趋势研究^[2]来看,目前业界重点关注的 6G 潜在使能技术主要包括人工智能与无线通信的融合、感知通信融合、新维度无线通信(智能超表面等)、太赫兹通信、无线网络架构,以及传统的无线空口技术的持续增强。本文选取了具有发展潜力的重点技术,举例分析 6G 关键技术特征及未来探索方向。在这些关键技术能力的支持下,未来 6G 网络能力将得到极大提升,支撑典型场景及业务体验的实现。

4.1 人工智能与无线通信的融合

通信技术与人工智能技术的结合将成为未来网络发展的重要趋势,人工智能技术在建模与学习、信道预测、智能信号生成与处理、网络状态跟踪与智能调度、网络优化部署等诸多方面具有重要的应用潜力,催生未来通信范式的演变和网络架构的变革。面向 2030 年及以后 IMT 系统的架构、协议和算法设计将深入挖掘并充分利用无线大数据的信息。同时,随着移动通信基站、边缘服务器和智能设备的广泛部署,移动通信网络将为数据收集、存储、交换和计算提供强大的平台,进一步支撑移动分布式和协作式的人工智能应用。

在空口技术方面,发送和接收端将直接通过神经网络实现通信信号的处理和传输,物理层通信将被看作一个端到端的信号重构过程,联合优化通信系统的发射机和接收机。智能空口技术有待进一步研究的方向包括:人工智能/机器学习在信号检测、编解码、波束选择、天线配置方面的设计和应用,智能化信道估计,跨层协作的算法设计,基于人工智能的无线资源管理训练和推理等。

在无线接入架构方面,人工智能原生网络架构将支持网络提供自动化和智能化服务,网络可以根据特定要求/目标/命令或环境变化进行自动优化和调整。未来的无线接入网络还将通过监控和跟踪网络状况,以自动化的方式诊断和修复出现的问题,实现全生命周期的自主性管理。可能的研究方向涉及高层协议、

网络架构和网络技术,例如:智能数据获取和管理、用户反馈引入网络的决策过程、控制面和用户面设计支持普适计算节点、分布式人工智能系统的中心控制、按需提供的能力、自适应解决方案等。

4.2 感知通信融合

在未来的通信系统中,更高的频段(例如从毫米波到太赫兹)、更宽的带宽、更密集的部署、更大的天线阵列,以及人工智能和通信节点之间的协作,都为在通信系统中集成无线感知能力提供了可能。感知通信一体化系统的设计理念,是让无线感知和无线通信两个功能在同一系统中实现且互惠互利。

在一体化设计中,技术发展可以分为通信和感知从松耦合到完全一体化的几个不同阶段^[7]。作为起点,通信和感知系统共享频谱和硬件等资源,在感知和通信模块之间开发有效的调度和协调算法以最大限度地减少相互干扰是一个关键问题。随着进一步的发展,通信和感知将协同工作以提高整体系统的性能。信号处理的集成,例如时域、频域和空间域的处理技术,可以为感知和通信服务进行联合设计。这一阶段的潜在技术方向将包括基于联合波形的空口设计、统一的波束赋形方案等,这对于提高一体化系统的效率至关重要。迈向成熟阶段,通信和感知将在频谱、硬件、信令、协议、组网等多个维度上协同优化,实现相互促进、互利共赢。进一步结合人工智能、网络协同和多节点协同感知等技术,通信感知一体化系统将提升整体系统性能和成本、降低系统的尺寸和功耗。

未来的研究方向包括基础理论、信道模型、一体化信号波形、数据处理算法、联合定位和感知设计以提高定位和感知精度,以及感知辅助通信等^[6]。

4.3 智能超表面

智能超表面(Reconfigurable Intelligence Surface, RIS)通过实时可编程的人工电磁表面来调整电磁波传播中的相位、幅度、频率和极化等信道参数,从而实现无线环境的动态控制。RIS 使无线环境从被动变为智能参与者,使得信道“可编程”。此外,还具有成本低、功耗低、易于部署的特点。RIS 将挑战基本的无线系统设计范式,可能影响无线系统架构、接入技术和网络协议的发展。RIS 的适用场景包括:实现 NLOS 场景下的全复用增益,支持热点区域,提升小区容量;

扩展网络覆盖,包括室外下行覆盖和上行增强、室外到室内覆盖、航空沿线覆盖等;提高小区边缘性能,并帮助减轻多小区同频干扰。

未来需要研究的内容包括:信道模型; RIS 辅助通信系统的基本限制和潜在收益,以确定 RIS 相比传统中继和不可重构无源反射结构的优势部署场景;无源波束赋形设计;由于缺少射频传输链路,需要考虑新的信道估计方法;材料研究和硬件实现; RIS 的实时控制协议和对整体网络架构的影响等。

4.4 太赫兹通信技术

太赫兹波指位于 100 GHz 到 10 THz 频率范围内的电磁波,它同时具有微波和光波的通信特征。凭借丰富的频率资源,太赫兹通信可以支持超高的通信速率,应用于全息通信、中短距无线接入和数据回传/前传等具有超高速率传输需求的场景,以及微尺寸通信等新型通信应用场景。此外,利用太赫兹通信信号的超大带宽、高精度定位和高分辨率感知成像也是太赫兹通信的重要应用场景。

在 IMT 系统中应用太赫兹频段存在一些众所周知的挑战,例如高频段的高传输损耗。此外,太赫兹信号更容易受到不同类型障碍物(例如人、墙、车辆等)的影响。根据文献[6]中的分析,发展太赫兹技术需要在以下方向进行深入研究。

(1) 超高速基带信号处理:需要考虑低量化精度信号处理技术,探索新的信号处理体制架构、空口架构和算法、低性能部件的补偿算法等。

(2) 超大规模阵列天线技术:发展小型化和阵列化的超大规模太赫兹 MIMO。

(3) 信道测量和建模:传播损耗模型、太赫兹电磁波物理传播机理、太赫兹信道建模方法等。

(4) 太赫兹关键电路/器件技术,以满足低功耗、高效率、长寿命等商用需求。

4.5 无线网络架构

随着网络规模的不断扩大和复杂性的不断提高,未来无线网络将以强化功能、简化架构、即插即用为设计目标,以基于服务和用户为中心,提供满足用户特定要求的按需能力。网络中的泛在 AI 将用于提升网络性能、降低部署和运维成本、实现资源管理的智能决策和数字化转型。

空天地一体化网络也是未来通信网络发展的重要趋势,地面网络与非地面网络(如高轨卫星网络、中低轨卫星网络、高空平台、无人机等)共同组成多维融合异构网络,提供全域立体无缝覆盖。空天地网络的实现需要构建包含统一空口协议和组网协议的服务化网络架构,满足不同部署场景和多样化的业务需求。

网络安全方面,6G 网络安全愿景将以 AI 为基础,具备网络主动免疫(可信技术,为基础设施提供主动防御)、信息虚拟共生(实现物理网络与数字孪生网络安全的统一与进化)、能力泛在协同(安全能力动态编排和按需部署,提升网络韧性)、安全弹性自治(端、边、网、云协同,准确感知安全态势,处置安全风险)的四大特征^[8]。

5 结束语

继 5G 规模商用之后,世界主要国家和地区均已启动 6G 研发布局,抢夺下一代移动通信发展主导权。目前仍然处于 6G 的早期探索阶段,业界正在热烈探讨 6G 愿景需求及关键技术,但尚未形成最终结论。本文详细讨论了未来 6G 的 5 个典型场景、预期具备的主要技术能力指标,以及支撑典型场景和能力指标实现需要重点考虑的关键技术方向,针对人工智能与无线通信的融合、感知通信融合、智能超表面、太赫兹通信技术、无线网络架构等业界重点关注的创新型潜在技术进行了分析,并提出未来的研究方向供业界参考。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R], 2021.
- [2] ITU. Preliminary draft new report ITU-R M [R], 2022.
- [3] ITU. Report on the 41st meeting of working party 5D [R], 2022.
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力白皮书[R], 2022.
- [5] 刘光毅, 李娜, 邓娟, 等. 6G 移动网络架构 SOLIDS——驱动力、特征及功能拓扑[J] Engineering, 2022, 8(1): 42-59.
- [6] WANG ZQ, DU Y, WEI KJ, et al. Vision, application scenarios, and key technology trends for 6G mobile

communications [J] Science China (Information Sciences) ,2022 ,65(5) : 5-31.

[7] WANG ZQ , HAN KF , JIANG JM , et al. Symbiotic sensing and communications towards 6G: vision , applications , and technology trends [J] Arxiv ,2021.

[8] IMT-2030(6G) 推进组 . 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R] ,2021.

作者简介:

徐晓燕 中国信息通信研究院移动通信创新中心高级工程师 ,博士 ,主要研究方向为面向 6G 的技术预研、ITU 相关标准化活动

韩凯峰 中国信息通信研究院移动通信创新中心高级

工程师 ,博士 ,主要研究方向为面向 6G 的无线人工智能、通信感知一体化技术

杜滢 中国信息通信研究院移动通信创新中心副主任 ,教授级高级工程师 ,主要研究方向为无线移动通信技术和标准

刘慧 中国信息通信研究院移动通信创新中心工程师 ,主要研究方向为面向 B5G/6G 的技术研究和仿真评估工作

赵妍 通信作者。中国信息通信研究院国际合作部主任工程师 ,主要从事 ICT 领域全球数字治理跟踪、多边国际组织和双边合作机制跟踪研究 ,以及 ICT 产业国际和国内政策、市场跟踪研究

6G vision and potential key technology analysis

XU Xiaoyan¹ , HAN Kaifeng¹ , DU Ying¹ , LIU Hui¹ , ZHAO Yan²

(1. Mobile Communications Innovation Center , China Academy of Information and Communications Technology , Beijing 100191 , China;

2. Department for International Co-operation , China Academy of Information and Communications Technology , Beijing 100191 , China)

Abstract: Following the large-scale 5G commercialization , major countries and regions in the world have launched 6G R&D to seize the dominance in the development of next-generation mobile communications. At present , IMT industry is actively discussing 6G vision and key technologies , but no final conclusion yet. This paper presents usage scenarios that 6G may provide in the future , the expected main key capability indicators , and the key technical directions that need to be considered to support the realization of typical scenarios and capability indicators. The paper also provides the analysis of the innovative potential technologies that IMT industry currently focuses on , such as the integration of artificial intelligence(AI) and wireless communication , the integration of sensing and communications , intelligent reconfigurable surfaces(RIS) , Terahertz communications technology , and wireless network architecture. Those future research directions are proposed for the industry's reference.

Keywords: 6G; usage scenario; key capability indicators; the integration of artificial intelligence(AI) and wireless communication; the integration of sensing and communications; intelligent reconfigurable surfaces(RIS) ; Terahertz communications technology; wireless network architecture

(收稿日期: 2022-08-01)