

## 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战

栾宁<sup>1</sup>, 熊轲<sup>1,2</sup>, 张煜<sup>3</sup>, 何睿斯<sup>2</sup>, 屈钢<sup>4</sup>, 艾渤<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044; 2. 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;  
3. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 4. 马里兰大学帕克分校电气和计算机工程系, 美国 大学公园市 20742)

**摘要:** 2020年我国已步入5G商用元年, 与此同时6G在全球范围的研究正式拉开帷幕。相比5G网络, 6G网络将具备更大信息容量、更高传输速率、更低传输时延、更大设备连接数量、更高频谱效率和更高能量效率, 并能支持更高移动速度的应用, 因此6G网络将涉及诸多新的关键技术, 同时也面临许多挑战。就6G的研究背景、发展、典型应用、性能指标、网络架构、关键技术、未来挑战等方面进行了系统性综述, 有望对未来6G网络相关研究提供一定的参考。

**关键词:** 6G移动通信网络; 触觉通信; 信息年龄; 空天地海一体化

**中图分类号:** TP393/TN92

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00253

## 6G: typical applications, key technologies and challenges

LUAN Ning<sup>1</sup>, XIONG Ke<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, HE Ruisi<sup>2</sup>, QU Gang<sup>4</sup>, AI Bo<sup>2</sup>

1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. State Key Laboratory of Rail Transit Control and Safety, Beijing 100044, China

3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

4. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, College Park, College Park 20742, USA

**Abstract:** 2020 marked the first year of the era of 5G commercialization in China and the inception of worldwide research in 6G. Compared with 5G networks, 6G networks will have larger information capacity, higher transmission rate, lower transmission delay, larger number of connected devices, higher spectrum efficiency, higher energy efficiency, and can support applications with higher mobile speed. Therefore, 6G networks will involve many new key technologies and also face many challenges. The background, development, typical applications, performance indicators, network architecture, key technologies and future challenges of 6G were systematically reviewed, which are expected to provide some reference for future 6G networks related research.

**Key words:** 6G communication network, tactile communication, age of information, integration of space-air-earth-sea

### 0 引言

2019年6月, 国家工业和信息化部(以下简称“工信部”)向运营商颁发了5G商用牌照, 标志着我国已正式步入5G商用时代。尽管如此, 各类新兴信息业务和服务对无线通信的需求仍在不断增

长, 并且当前5G网络所采用技术和性能指标仍存在一定的提升空间和局限性。为了有效应对新兴信息业务的通信需求, 启动6G的研发势在必行<sup>[1]</sup>。

首先, 5G通信系统存在通信覆盖范围上的不足。就我国而言, 受经济、技术等因素制约, 80%以上的陆地和95%的海洋仍未被移动网络有效覆

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2022-01-02

通信作者: 熊轲, kxiong@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(No.2020YFB1806903); 国家自然科学基金资助项目(No.62071033)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806903), The National Natural Science Foundation of China (No.62071033)

盖，这极大制约了偏远地区、山区、深海区域的资源开发和经济发展；其次，5G 在移动接入能力上目前只能支持 500 km/h 的移动速度，尚不能很好支持飞机等每小时上千千米的移动体通信。随着未来 1 000 km/h 的新型高铁等交通工具的发展，支持更高移动速度的移动通信系统和技术亟待研究；再次，现有 5G 网络平均每平方米允许接入一个设备，随着物联网和万联网的发展，单位面积上需要接入网络的设备数量迅速增长，因此需要能够支持更大连接密度的通信网络技术；此外，5G 虽可提供毫秒级时延，但在某些特殊工业控制和智能控制场景，时延需求将严格在亚毫秒级<sup>[2]</sup>，同时新兴业务对信息的时效性等也将有更高要求，5G 通信尚不能满足，故 6G 通信技术的研究迫在眉睫<sup>[3]</sup>。

6G 的目标是带领人类进入泛在智能化信息社会，并融合通信、计算、感知、智能等建立起空天地海泛在移动通信网，实现全球泛在覆盖的高速宽带通信。相比 5G 网络，6G 最大的特点在于其全球泛在覆盖所带来的多样化：数据来源的多样化、应用的多样化、通信手段的多样化、计算的多样化等，这使得 6G 网络将具备更大信息容量、更高传输速率、更低传输时延、更大连接数量、更高频谱效率、

更高能量效率，从而支持更广泛的应用。

### 1 6G 产生与发展

移动通信网络的发展如图 1 所示，1G 网络使无线移动电话业务成为现实，2G 网络使人们能够使用手机短信和手机上网，3G 网络具备了视频通话能力，4G 网络能够传输更高质量的视频图像。1G 到 4G 主要解决了“人-人”间的网络连接，实现了“沟通泛在”；5G 网络则打造了“人-机-物”工业互联体系，正在推动“信息泛在”成为现实；作为 5G 的延续，6G 网络将进一步使万物的连接延伸至智慧层面，达到“人-自然-智慧”的连接与融合，实现“智能泛在”。

当前，世界各国已相继启动 6G 技术的研发。2018 年 3 月，工信部部长苗圩宣布中国已启动 6G 移动通信系统的研究。同年 7 月，国际电信联盟电信标准化部门 (ITU-T) 第十三研究组全会召开并成立了“网络 2030”焦点组，专门负责 2030—2040 年网络架构及需求研究，目的是保持网络后向兼容，支持目前和未来的新型应用。2018 年，芬兰启动了 6G 技术的研究，并于同年年底公告了 6G 系统的研究成果与进展。2019 年 3 月，美国联邦通信委员会

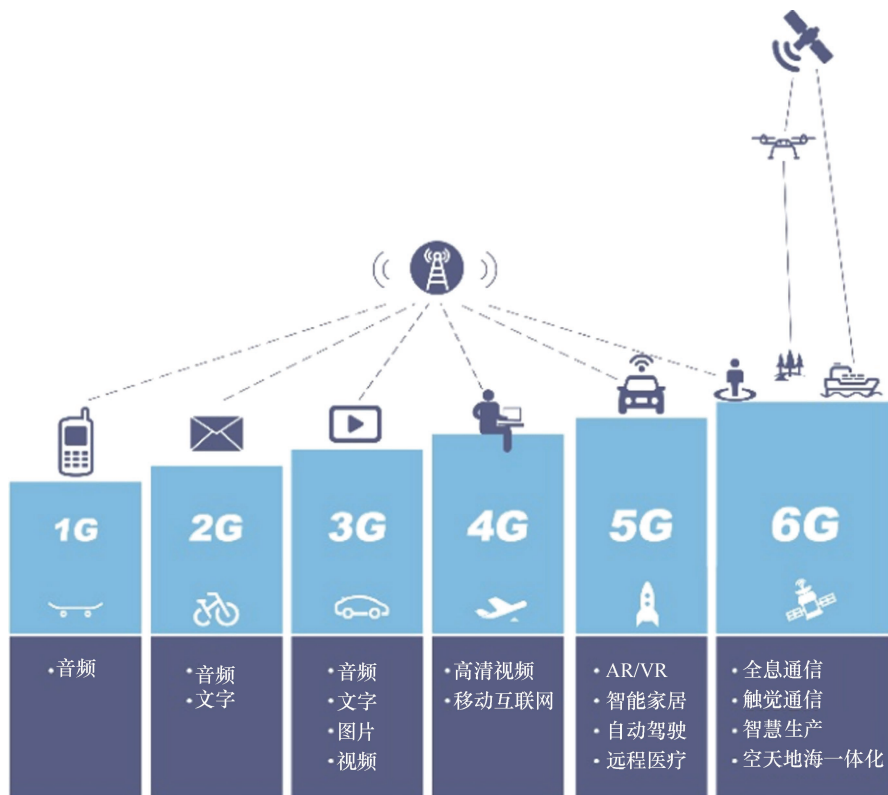


图 1 移动通信网络的发展

(FCC) 通过了开放太赫兹波频段用于 6G 网络的决议。2019 年 11 月, 中国科学技术部会同国家发展和改革委员会、教育部、工信部、中国科学院和国家自然科学基金委员会在北京组织并召开了 6G 技术的研发启动会, 会议宣布成立了我国 6G 研发推进工作组和 6G 技术研发总体专家组。同月, 世界 5G 大会召开, 中国联合网络通信集团有限公司和中国电信集团有限公司宣布已分别展开 6G 相关技术研究。

与此同时, 学术界对 6G 的关注度和热度也在不断增长<sup>[4]</sup>。2019 年 3 月, 电气电子工程师学会 (IEEE) 召开了首届全球 6G 无线峰会, 工业界和学术界诸多知名工程师和学者与会探讨了 6G 愿景, 交流了相关理论和技术挑战及最新成果。2019 年 5 月, IEEE ComSoc 在国际通信旗舰大会 IEEE ICC 组织了主题为“Empowering Intelligent Communications”的专题论坛, 众多与会专家针对如何实现 6G 网络智能通信进行了深入交流与讨论。ZONG 等<sup>[5]</sup>探索了 6G 的关键驱动因素和新的逻辑起点; ZHANG 等<sup>[6]</sup>分享了对未来 6G 网络的想法, 并介绍了潜在技术; HEATH 等<sup>[7]</sup>论述了 6G 网络在物理层的关键方向, 如何支持更高的带宽, 并强调了机器学习在 6G 网络设计中的作用; YANG 等<sup>[8]</sup>介绍了 6G 网络在传输层和网络层的几种先进技术; LETAIEF 等<sup>[9]</sup>展示了基于人工智能技术的 6G 开发线路蓝图; SAAD 等<sup>[10]</sup>讨论了 6G 的应用、技术及发展趋势; NAYAK 等<sup>[11]</sup>从硬件到系统讨论了 6G 使能技术各方面面临的问题和挑战; LU 等<sup>[12]</sup>对 6G 网络的发展前景、核心技术、应用场景、面临的挑战以及相关问题进行了讨论。

## 2 6G 典型应用

应用需求是推动 6G 发展的核心驱动, 未来 6G 通信系统将在远程全息、数字孪生、自动驾驶、XR 应用、精准定位、智慧生产等应用领域发挥巨大作用。

### 2.1 远程全息

当前人类社会已实现语音、图像、视频等 2D 通信, 未来人类必将追求 3D 通信, 即全息通信。通过实时捕捉、传输以及渲染, 全息通信可将处于不同地理位置的人或物的 3D 全息影像传输到同一位置, 用 3D 重建虚拟真实物理连接<sup>[13]</sup>。如在全息视频会议中, 用户可获得面对面交流的真实感。除语音业务外, 全息通信也将应用于远程医疗、

远程教育、远程办公等领域, 助力各行业数字化转型升级。

### 2.2 数字孪生

数字孪生通过对现实世界中的人和物进行全面信息采集与感知, 利用数字信息在虚拟世界构建对应的映射, 对现实世界运作进行实时计算模拟, 并通过数字计算对未来进行有效预测与干预<sup>[14]</sup>。例如, 通过孪生体域网能够构建虚拟人体, 对人体运行状态进行实时跟踪和模拟, 对人体病变进行预测和预防, 并且还能对虚拟人体进行模拟手术和用药。

### 2.3 自动驾驶

自动驾驶等智能交通在未来可以极大提高驾驶的安全性和舒适度, 同时也可以减少交通拥堵、减少尾气排放、提升运输效率, 受到了世界各国政府和大型互联网企业的极大关注。预计 2030 年后将有上百万联网的自动驾驶车协同运行, 包括公交车、物流车、无人机等, 届时每辆汽车上会安装大量传感器, 采集车辆和周围路况信息便于交互以保证车辆行驶安全。当然, 要对行驶中的汽车进行准确、实时控制, 数据交互的速度要求极快, 时延要求极低, 可靠性要求极高。

### 2.4 XR 应用

手机等智能移动终端已成为人类社会生产生活中的必需品。随着无线网络、新型显示技术、传感技术等快速进步, 智能手机将有可能被新的存在形式 (如轻量型的智能眼镜或手环) 代替, 更加便捷地服务于人们的工作、娱乐、生活。未来的智能手机, 将会产生裸眼 3D、虚拟现实 (VR, virtual reality)、增强现实 (AR, augmented reality)、混合现实 (MR, mix reality) 等效果, 给用户立体、全新、身临其境的感受<sup>[15-16]</sup>。

### 2.5 精准定位

在未来万物智联时代, 大量垂直行业都需要高精度的室内、室外定位服务, 如自动驾驶、轨迹回访、精准营销、AR 等应用。传统的卫星定位以及蜂窝小区多边定位的精准度不高, 难以满足精细化智能服务业务的需求。6G 网络新的定位技术将为实现厘米级的精准定位提供有力支撑<sup>[17]</sup>。

### 2.6 智慧生产

数字孪生、纳米技术、人工智能、移动边缘计算等的快速发展, 推动各行各业从数字化、网络化向智慧化升级, 同时也催生出很多新的智慧生产应用, 如

水下种植、太空农业、健康监测等<sup>[1]</sup>。要实现上述新的应用,需要全覆盖网络,1G到5G主要解决的是陆地通信问题,而地球上更大的面积,如海洋、沙漠、原始森林等未来更加需要全面监测和科学开发利用,需要依靠未来6G网络实现全面深度覆盖。

### 3 6G性能指标

在上述新业务的需求驱动下,移动通信网络迫切需要继续向更为先进的一代演进。移动通信网络每更新一代,性能要有10~100倍的提升。6G网络的各个性能指标相比于5G也将提升10~100倍,5G与6G性能指标对比见表1。除了峰值速率、网络时延、连接密度等传统通信指标,6G网络在移动性支持、覆盖范围、安全、信息时效性等方面也会有新的指标要求<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 超高峰值速率

6G将使用太赫兹通信技术,其最大优点是带宽大、传输速率高,非常适用于未来高带宽业务场景。根据理论分析和实验测试,在200~400 GHz的频谱范围内,6G网络单用户的峰值速率和单小区的吞吐量将分别达到100 Gbit/s和1 Tbit/s<sup>[18]</sup>。

#### 3.2 超大体验速率

5G网络用户体验速率是100 Mbit/s。预计6G时代VR应用已经成熟,并将成为超大速率用户体验的代表性应用。根据预设的VR360中极致VR体验需求,带宽需求=视频分辨率×色深×帧数/压缩率=(23 040×11 520)×12×120/350=1 Gbit/s,因此,6G用户体验速率至少将达到1 Gbit/s<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 超低网络时延

5G网络可满足的时延需求为毫秒级,如车联网需要大约1 ms的时延。在6G时代,低时延的通信需求大多数来源于工业互联网的场景,工业精准控制和便捷性要求设备间的无线传输代替传统的机器与机器间的有线传输,而工业控制的时延指标需要控制到0.1 ms左右<sup>[19]</sup>。

#### 3.4 超高连接密度

5G的连接密度测算为100万个/km<sup>2</sup>,这意味着平均每平方米最多支持接入一个5G设备。考虑到未来的工业生产、智能穿戴和智能家居等场景存在很多的网络连接需求,连接密度较5G将上升近10倍。因此,6G的连接密度建议为100个/m<sup>2</sup>(1亿个/km<sup>2</sup>)<sup>[19]</sup>。

#### 3.5 超强的高移动支持能力

自5G网络开始,对高速移动性的支持能力已经成为衡量移动通信系统的关键性能指标之一。5G网络目标是能够支持移动速度为500 km/h的高铁乘客的接入。在6G时代,考虑民航乘客和更高移动速度的地面运输工具(如真空管道高铁)的需求,需要支持移动速度高达1 000 km/h的用户接入<sup>[19]</sup>。

#### 3.6 超高无缝定位精度

由于卫星定位方法以及蜂窝小区多边定位方法的精度不高,传统网络的定位精度,尤其是室内的定位不够精准。为支撑更多基于精细地理位置的应用,6G通信系统中将结合多种技术,如GPS、Wi-Fi、蓝牙、超宽带和机器学习,改善定位精度,实现超高无缝定位,达到室内定位精度

表1 5G与6G性能指标对比

性能指标	5G	6G
峰值速率/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	10	1 000
体验速率/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	0.1	1
网络时延/ms	1	0.1
连接密度/(个·m <sup>-2</sup> )	1	100
移动能力/(km·h <sup>-1</sup> )	500	1 000
定位精度	室内10 cm、室外5 m	室内1 cm、室外50 cm
频谱效率/(bit·s <sup>-1</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	100	200
能量效率/(bit·J <sup>-1</sup> )	100	200
基站算力/Tops	100~200	1 000
覆盖范围	陆地局部	空天地海
安全性	补丁式安全	内生安全
信息时效性	较高	高

1 cm、室外 50 cm 的效果<sup>[17]</sup>。

### 3.7 频谱效率

若考虑编码增益, 在 64QAM、192 天线、16 个数据流的设定下, 5G 的理论频谱效率极限在 100 bit/(s·Hz)。由于 6G 通信系统采用了太赫兹频段, 结合轨道角动量的多流和智能波束成形技术, 在 1024QAM、1024 天线的情况下, 频谱效率可达到 200 bit/(s·Hz)<sup>[19]</sup>。

### 3.8 能量效率

6G 通信系统中的太赫兹所能提供的带宽会明显高于 5G 毫米波, 相应的能量消耗也会增大。但能耗不会成倍地增长。总体的能量效率(单位能量传输的数据量)相较 5G 会有明显提高。5G 能量效率为 100 bit/J, 6G 预计将达到 200 bit/J<sup>[19]</sup>。

### 3.9 基站算力

5G 引入了移动边缘计算, 使核心网的部分计算功能下沉到边缘, 让基站具备了一定的算力(每秒的操作次数)。6G 网络中移动边缘计算功能将进一步增强, 与此同时, 人工智能的引入, 也使得基站的智能计算能力变得异常强大。5G 的基站算力实际需求是 100~200 Tops (operation per second), 6G 预测将达到 1 000 Tops<sup>[20]</sup>。

### 3.10 超大覆盖范围

1G 到 5G 都在围绕陆地通信, 而地球上海洋与陆地面积之比大约为 7:3, 并且在陆地上很多沙漠、原始森林等区域尚未得到通信网络覆盖, 5G 仅覆盖了地球表面约 20% 的区域。6G 网络将融合地面移动通信、近地空间平台、无人机平台、中低轨卫星等技术, 将 2D 网络覆盖升级为 3D 网络, 实现空天地海一体化的全覆盖, 解决空天地海覆盖受限的问题, 扩大覆盖范围<sup>[21]</sup>。

### 3.11 超高安全性

为保证传输安全性, 当前的 5G 网络仍然使用了基于 RSA (Rivest-Shamir-Adleman) 公钥密码体系和传统加密算法。在大数据和人工智能应用的压力下, 传统方法的安全性正在面临越来越大的威胁。6G 网络将结合物理层安全技术和可见光通信 (VLC, visible light communication) 的量子密钥分发应对数据安全挑战。此外, 在 6G 时代, 更为先进的量子计算和量子通信技术也有望得到部署, 打造一个超安全的网络。

### 3.12 信息时效性

随着物联网的大规模部署, 出现了大量的信息

实时更新系统, 如环境监测、工业控制等。各类更新系统需要基于实时的信息更新包进行更准确的决策。这些系统对信息时效性的敏感度极高, 然而传统的网络性能指标, 如时延、吞吐量, 不能有效表征信息时效性。为了有效刻画信息的新鲜度, 信息年龄 (AoI, age of information)<sup>[22]</sup> 受到了学术界和业界的广泛关注。其定义为更新信息自产生到被目的端接收以来的时间, 可以有效地刻画更新信息的新鲜程度。在实时更新系统部署更广泛的 6G 网络中, 信息时效性将会成为与其他传统网络性能指标共存的一个新的度量指标<sup>[23-24]</sup>。

## 4 6G 网络架构

传统网络的组网主要依靠地面基站实现, 6G 的组网会有颠覆性的变化。5G 网络与 6G 网络架构特点对比见表 2。从空间结构上看, 6G 将打造一个空天地海一体化的网络; 从网络设计上看, 6G 将人工智能与无线网络深度融合, 打造自主、智慧的网络, 实现类脑结构的超级智能化组网; 从网络组成上看, 6G 是去蜂窝的网络架构, 并且对异构网络深度集成, 把不同类型的网络在协议和组织方面融合, 以实现万物智联。综上所述, 6G 将通过人工智能以及新型网络技术, 打造空天地海一体化及智能网络, 可以提供全覆盖、超智能、动态、按需的网络服务。

### 4.1 空天地海一体化网络

空天地海一体化网络将在广度和深度两个维度上扩大覆盖范围。为此, 将以传统的地面无线网络为基础, 同时结合卫星通信与海洋通信, 覆盖太空(通信卫星、地球成像卫星和导航卫星网络)、空中(飞机、无人机通信网络)、陆地(地面无线网络)和海洋(水下无线通信网络等)的自然空间, 可以为任意地理空间提供无线覆盖和通信服务<sup>[25]</sup>。

6G 移动通信网络的架构如图 2 所示, 6G 将打造一个由地面无线网络、中低轨卫星、近地空间平台/无人机、飞行器等集成的空天地海一体化网络, 未来可以真正实现“无缝覆盖、随遇连接、按需服务、安全可靠”的目标。

表 2 5G 网络与 6G 网络架构特点对比

	5G	6G
覆盖特性	陆地	空天地海全域覆盖(支持随时随地接入)
智能性	智能组网	智慧内生(AI 与网络深度融合)
网络架构	蜂窝架构	去蜂窝架构、异构(柔性、按需服务)

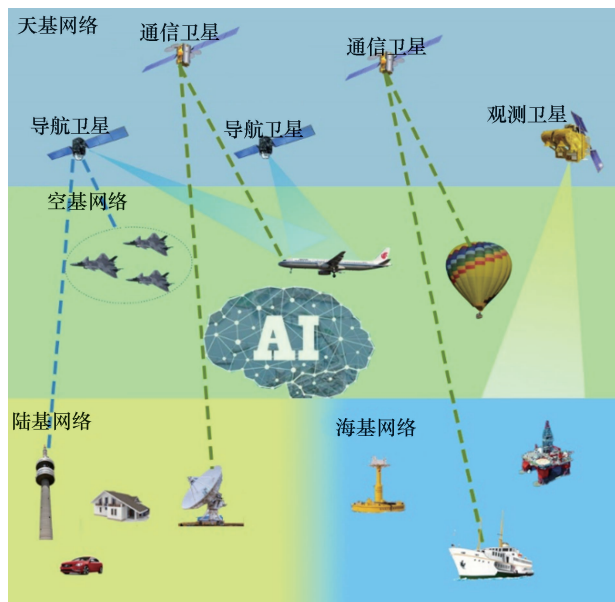


图2 6G移动通信网络的架构

#### 4.2 人工智能与无线网络深度融合

6G 将是一个大数据驱动的网络，通过将人工智能 (AI, artificial intelligence)、大数据等技术与网络深度融合，使网络在自适应、自感知和预测方面性能表现更优。AI 技术将自下而上地深入、渗入 6G 通信网络各层，如基于 AI 的物理信道估计、基于 AI 的网络架构以及决策机制、基于 AI 的终端设备、基于 AI 的人脑思维与 6G 网络的结合等。6G 最终将打造以用户为中心的定制化服务，将智能化贯穿于网络端到端的每一个环节中，提升 6G 网络的智能化水平<sup>[26]</sup>。

目前，基于人工智能和大数据技术的智能通信系统研究，已成为无线网络领域的前沿热点。例如，JIANG 等<sup>[27]</sup>总结了用于大规模 MIMO 优化、异构网络设计和设备到设备通信的机器学习技术。HAN 等<sup>[28]</sup>提出了一种新的移动网络架构，使大数据分析能够促进物理层优化。

#### 4.3 去蜂窝的异构网络

从 1G 到 5G，移动通信网络采用蜂窝架构，以频率复用的方式提升系统容量。然而，蜂窝小区面积的不断缩小引发了小区间干扰和频繁越区切换的问题。对此，可能在 6G 中引入去蜂窝网络架构，其思想是“以用户为中心”，通过部署多个分布式接入点，利用相同的时频资源为所有用户服务，大幅降低路径损耗，减少多用户干扰，从而使全区域均匀覆盖并大幅提升用户体验<sup>[29]</sup>。

此外，为了实现 6G 网络万物智联，并提供舒

适、安全和智能的服务，6G 将对异构网络深度集成。现有的异构网络包括宏蜂窝 (macrocell)、微蜂窝 (femtocell)、Wi-Fi、无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network)、物联网 (IoT, internet of things) 和车联网 (IoV, internet of vehicles) 等，这些不同类型的网络必须在协议和组织方面集成融合<sup>[30]</sup>。基于 6G 的异构网络架构，允许根据用户的行为特点 (如车载用户)、业务特点 (如实时性要求高) 和网络特点，为用户选择合适的网络，并采用软件定义等可重构技术，实现动态、按需、灵活组网，在为用户提供高质量通信服务的同时有效提升网络资源效用。

## 5 6G 关键技术

技术是推进 6G 发展的基础，为了提供更好的服务，除网络架构外，6G 将集成新的先进技术提高其可扩展性、灵活性和效率。6G 移动通信网络关键技术如图 3 所示，6G 有望采用的先进技术主要包括新型频谱使用技术、高效无线接入技术、网络智慧使能技术以及安全可持续技术等。

### 5.1 新型频谱接入技术

为实现超高速率传输，6G 网络需要大量频谱资源。而获得频谱的方法分为两种：一是扩展高频段，二是提高现有频谱的利用效率。对于前者，当前 5G 可以支持 52.6 GHz 的毫米波，6G 将会拓展到太赫兹甚至可见光频段，因此太赫兹通信以及可见光通信技术可以作为 6G 的候选技术。对于后者，为了避免干扰等问题，5G 和 5G 之前通信系统都采用了固定频谱分配方式，分配出的频段即便没有要传的数据也不会让出资源供其他系统使用，导致频谱利用率很低；为了提升频谱利用效率，6G 网络将采用智能动态频谱分配和管理；为了保证频谱使用的安全性和可追溯性，还将采用区块链技术实施动态频谱共享。

#### 5.1.1 太赫兹通信技术

6G 将使用太赫兹频段 100 GHz~10 THz，其频率相比于 5G 毫米波高很多。移动通信系统从 1G 到 5G，对应的电磁波频率越来越高，频率越高，可以分配的带宽范围就越大，单位时间内传输的数据量越多，用户上网体验越快。

太赫兹通信优点有<sup>[31]</sup>：太赫兹波频率较高、带宽较宽，可满足宽带无线传输的频带需求，提供高达 Tbit/s 的通信速率。其具有更窄的波束、更好的方向性、更强的抗干扰能力，在 2~5 km 内能实现

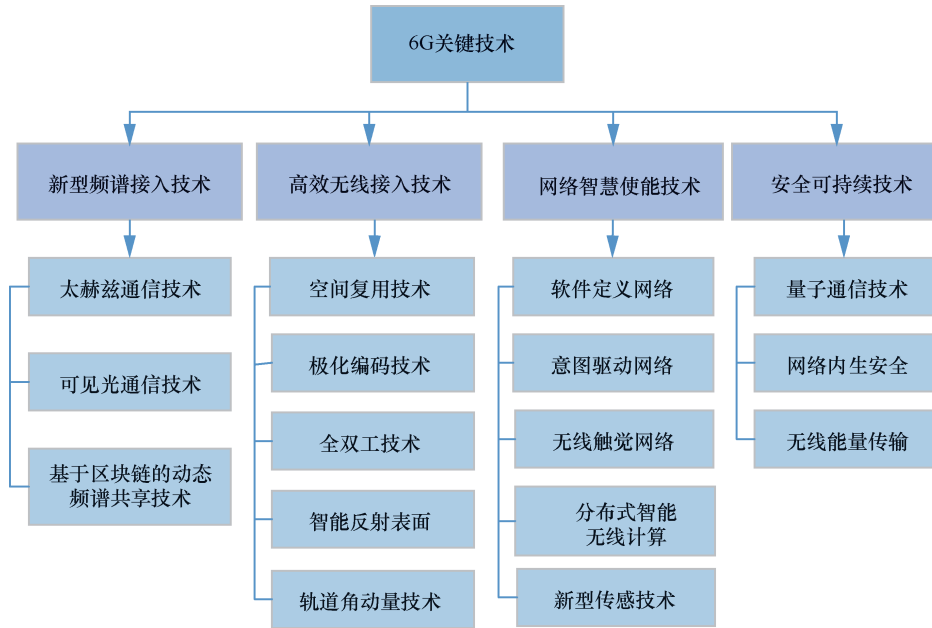


图 3 6G 移动通信网络关键技术

高安全通信; 在外太空, 350  $\mu\text{m}$ 、450  $\mu\text{m}$ 、620  $\mu\text{m}$ 、735  $\mu\text{m}$  和 870  $\mu\text{m}$  的太赫兹波具有相对透明的大气窗口, 可在低功耗实现无损传输, 并完成长距离通信。因此, 可以应用于空间通信中, 尤其适用于卫星之间以及卫星与地球之间的宽带通信。此外, 太赫兹波的能量效率较高、穿透性很强, 可以满足某些特殊场景的通信需求。

太赫兹技术通过与低频通信集成可应用于地面超宽带无线接入和光纤替代场景。

### 5.1.2 可见光通信技术

传统的射频通信技术受频谱资源的限制, 难以满足未来超高带宽要求。可见光通信技术<sup>[32]</sup>可以利用荧光灯或者发光二极管发出的可见光波段的光作为载体传递信息。可见光通信以其提供短距离、高带宽、绿色低碳的信息交互逐渐成为新一代核心通信技术。

可见光通信优点有: 通信距离短, 从天花板到移动设备通常只有几米, 这意味着功率消耗比较低; 光谱是不受管制的, 可利用资源丰富; 可见光通信支持的网络具有更高的安全性。由于可见光穿透能力极差, 其传输范围较小, 因此信息不容易被截取, 有利于提高信息安全性。

可见光通信不会产生电磁辐射, 也不容易受外界电磁干扰, 因此可以广泛用于对电磁干扰敏感的特殊场景, 如医院、飞机、加油站和化工厂等。可见光通信还可以为智能家居和室内导航提供新的

手段, 并为室内深度覆盖提供绿色、泛在、廉价的接入方式。

### 5.1.3 基于区块链的动态频谱共享

6G 将采用更智能、更灵活的频谱共享技术, 届时, 几大运营商或许将不再划分通信频段, 而是共享频段。

由于无线电频谱为稀缺资源, 为了合理分配和有效利用, 美国 FCC 于 2015 年提出了动态频谱共享技术, 推出了 3.5GHz 的公众无线宽带服务 (CBRS, citizens broadband radio service), 并且可以通过集中式频谱访问数据库系统动态管理不同类型的无线业务, 以提高频谱利用效率。如果一个用户不使用某个频谱资源, 则允许其他用户访问使用, 实现了按需使用、提高频谱利用率的效果。

CBRS 支持通过集中式数据库进行频谱共享访问, 然而成本较高, 并且存在安全性问题。因此, 6G 将利用基于分布式数据库的区块链技术<sup>[33]</sup>, 这不仅有利于降低成本, 如动态频谱接入的管理成本, 并且由于整个系统由多个节点共同维护, 系统更安全可靠<sup>[34]</sup>。

### 5.2 高效无线传输技术

为了得到更大的信道容量实现高效的无线传输, 一是不断增强空间复用、信道编码、全双工等传统技术的实际性能; 二是不断研究新技术, 使信息传输模式有革命性的突破, 如智能反射表面技术和轨道角动量技术。

### 5.2.1 空间复用技术

由计算式  $c = f\lambda$  知, 频率越高, 对应的波长越短, 波的绕射能力越差, 损耗越大。6G 使用高频的太赫兹和可见光频段, 需要解决电磁波损耗大、覆盖范围小等问题。大规模多输入多输出 (MIMO, multi input multi output)<sup>[35]</sup> 天线以及波束赋形<sup>[36]</sup> 是潜在的解决技术。MIMO 通过增加发射和接收天线的数量来弥补高频路径上的损耗, 在发射机处高速数据流被分成几个低速子流, 并通过不同的发射天线在同一频段发射。因为有足够多的空域子信道, 在接收端完全可以区分并行的子流, 达到增加信道容量的效果。而当使用天线数量很多时, 波束宽度就很窄, 不能达到 360° 全方向, 波束赋形可以通过对波束的管理控制聚焦的方向, 让波束覆盖基站服务范围内任意位置的用户。

空间复用技术作为 6G 的关键技术之一, 优点主要是在 MIMO 多副天线的配置下可以提高传输数据数量, 提高频谱利用率。此外, 其超高空间分辨率将支撑高精度定位和环境感知的实现。

### 5.2.2 极化编码技术

信道编码技术作为无线通信物理层的核心技术之一, 可以使信号可靠地传输。但现有的编码方法 (如卷积码等) 无法达到香农的信道传输容量上限。极化编码技术为 6G 网络中逼近信道容量极限提供了可能。

极化码的优势: 在二进制输入对称离散无记忆信道中, 极化码能逼近香农极限; 编码译码复杂度以及误码率都较低。

极化码在编码调制、有记忆信道、窃听信道等方面的应用中展现了优异的性能, 在某些应用场景中可以达到与当前最先进的信道编码技术 Turbo 码和低密度奇偶校验码 (LDPC 码) 相同或更优的性能<sup>[37]</sup>。

### 5.2.3 全双工技术

超大的业务需求与紧缺的频谱资源之间的矛盾愈加突出, 全双工技术<sup>[38]</sup> 将成为解决这一问题的潜在技术方案。随着双工技术的进步, 6G 通信系统有望实现全自由度双工 (free duplex) 模式, 即可以根据业务需求灵活地调整为双工或全双工 (full duplex) 模式, 完全不会受到双工机制对频谱资源利用的限制。

全双工技术的优点是使上行和下行同时传输, 在不占用额外带宽的情况下提高复用能力和吞吐

量<sup>[39]</sup>。全双工技术的应用场景有以下几种: 一是低发射功率场景, 包括终端与终端 (D2D, device to device) 通信系统, 以及覆盖范围小、发射功率低的密集蜂窝网场景; 二是收发设备复杂度与成本不受限的场景, 如无线中继和无线回传; 三是窄波束且空间自由度多的场景, 包括使用大规模 MIMO 的 6 GHz 以下频段和毫米波/太赫兹的场景。

### 5.2.4 智能反射表面技术

网络容量的提升伴随着高硬件成本和复杂干扰问题, 此外, 信号传播是随机、不可控制的。智能反射表面 (IRS, intelligent reflecting surface)<sup>[40]</sup> 技术可以利用软件控制信号的反射, 使传播环境得以重新配置。反射面包含多个无源反射单元, 其作用是对入射信号进行相位移动并反射, 通过控制每个反射单元的相移, 智能地控制反射信号, 以达到增加接收信号功率、减小干扰以及安全传输等效果。

智能反射表面技术的优点<sup>[41]</sup> 包括: IRS 工作局限在短距离内, 因此可以密集部署, 能耗和成本较低, 也无须在 IRS 间进行复杂的干扰管理; 其次, 通过高度可控和智能信号反射修改无线信道环境, 改善了无线链路的性能, 提高了灵活度并且智能可编程; 此外, 通过调整 3D 被动波束的形成, 可以使 IRS 反射的信号与其他链路的信号相加, 有利于增强接收端的信号, 或者消除一些干扰信号。

IRS 辅助无线传输的典型应用有: 当用户与基站之间的链路被障碍物阻挡, 在他们之间部署 IRS 可以使信号智能反射从而绕过障碍物, 建立一条虚拟的链路; 小区边缘用户会受到多个相邻基站的信道干扰, 在这种场景下, 在小区边缘部署 IRS 可以增加接收的信号功率, 减少干扰, 形成“信号热点”和“无干扰区”, 以提升网络性能<sup>[42]</sup>。

### 5.2.5 轨道角动量技术

轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum) 也称为涡旋电磁波<sup>[43]</sup>。与传统的平面电磁波基信号不同, OAM 具有相位旋转因子。OAM 的最大特点是, 与束流涡度和相位奇异性相关的电磁波特性和具有相互正交的无限多个本征态 (即 OAM 模), 因此, 原则上允许多个信道增加传输容量和频谱效率。

基于 OAM 的无线通信有 3 个优点: 通过 OAM 模式的新域获得高频谱效率; 由于 OAM 提供了一种新的多址方法, 即模式分割多址, 在不消耗更多频率和时间资源的情况下, 可以支持更多用户访问系统; 此外, OAM 既可以在窄带内使用, 也能与宽带跳频

联合使用, 因此可以提高通信的抗干扰能力。

OAM 有望在未来的 6G 网络中得到应用, 但有 3 个方面问题需要进行更深入的研究: 一是 OAM 无线电波的多路复用和解多路复用, 在射频系统中, 难以对 OAM 无线波束进行组合和分束等操作, 这意味着同轴传输不易保证; 二是电涡流信号的传输有 3 个典型挑战需要攻克: 发射-接收机必须相互对齐, 便于使用不同 OAM 模式分离信号; 大气湍流、雨和雾等衰落会干扰接收器处的波前相位; 随着 OAM 模式阶数的增加波束变得越来越发散, 严重降低了传输距离和频谱利用率, 使 OAM 光束会聚是有效利用所有 OAM 模的关键; 三是无线电涡流信号的接收, 即在接收器处如何有效地分离和检测涡流电磁波调制信息也是一个关键的问题<sup>[44]</sup>。

### 5.3 网络智慧使能技术

6G 网络不仅包含 5G 涉及的人、机、物这 3 个维度的核心元素, 还包含第 4 维元素——智。软件定义网络技术使得网络管理更灵活; 意图驱动网络基于人工智能以及实时采集的数据完成用户意图的获取, 使网络能够主动优化性能; 无线触觉网络技术使得网络实时传递触觉, 甚至情感; 此外, 6G 将和人工智能、机器学习等深度融合, 分布式智能无线计算、智能传感等技术大大提高网络的智能化水平。

#### 5.3.1 软件定义网络

软件定义网络 (SDN, software defined network)<sup>[45-46]</sup>采用控制和数据转发分离的设计思想, 使网络具备灵活的配置能力和可编程性。在 SDN 中, 数据转发的部分由通用硬件实现; 负责控制的部分可以适配各种各样的业务特性, 而且通信可以通过编程实现。而 6G 将打造空地海一体化网络, 其特点有: 复杂异构、拓扑高动态和设备及协议异质性等, 给网络资源的协同管理和调度带来了困难, SDN 用于 6G 无线网络中将有效处理卫星通信网络和地面移动通信网络从设备和协议的异质性到网络功能和架构的异构性<sup>[47]</sup>。

SDN 的优势在于: 可对多厂商网络环境进行集中高效控制; 可对网络资源快速调整、分配, 降低网络管理复杂度; 可增强网络可靠性和安全性; 可实现与应用对应的细粒度网络控制, 用户体验更好。

SDN 的典型应用有: 可应用于校园/社区网络中有线与无线网络的协同, 根据用户的需求自动调整分配网络资源; 此外, 由于其较高的服务器利用率, 可以应用于数据中心。

#### 5.3.2 意图驱动网络

意图驱动网络 (IDN, intent-driven network)<sup>[48-49]</sup>通过人工智能和自动化技术实时感知用户的体验质量, 从而分析、预测以及优化网络。华为技术有限公司曾在世界移动通信大会上宣布意图驱动网络, 称该解决方案将“创造一个数字化的实体网络基础设施”。

IDN 有以下特征及优势: 通过大数据和人工智能技术可以提前识别网络故障, 并进行主动的体验优化和故障修复; 通过开放 API 可以支持第三方大数据和云平台的连接; 可以识别和预防安全威胁; 可以实现跨架构、协议和基站的内置运维自动化; 超宽带技术支持低时延和高带宽的连接。这些技术可以准确获取用户的意图并执行。

意图驱动网络具有智慧、开放、安全、简约、超宽的 5 个关键特征, 有利于最大化企业商业价值。应用领域覆盖电力、金融、政府、运输等行业。

#### 5.3.3 无线触觉网络

5G 网络的万物互联指对万物的感知和连接, 6G 网络的智联万物, 不仅要感知智能对象, 也要实时地响应与控制网络, 即“触觉互联网”<sup>[50]</sup>。无线触觉网络就是指能够实时感知、触摸以及控制的通信网络。

其优点是: 通过触觉网络传递的信息超越图片、文字、音视频, 还将有视觉、味觉、触觉等, 甚至可以将情感进行传递, 大大提高网络沟通和学习效率。

无线触觉网络的应用场景有: 人际触觉通信、实时触觉广播、远程机器人控制与机器控制、沉浸式虚拟现实、汽车和无人机控制等。

#### 5.3.4 分布式智能无线计算

未来, 无线设备 (如智能手机、传感器等) 连接密度会非常高, 需要高效、及时地处理大量数据, 就要用到分布式智能无线计算, 其原理是将分布式学习机制部署于基站、终端和边缘计算, 通过人工智能协作实现分布式动态连接、路由选择、负载均衡和数据缓存等, 从而保障通信稳健性, 提升应用体验。通过分布式智能无线计算, 算法可以在数量有限的基站、用户终端和物联网设备上分布运行, 而不是集中于核心网络中。然而, 由于终端和设备不如高性能集中服务器可靠, 所以分布式和自组织方案必须在设备和链路故障时提供强大的健壮性<sup>[51]</sup>。

分布式智能无线计算的优点是将云端的计算

和存储能力下沉,让智能更接近用户和应用程序,极大减少时延,让用户享受到更佳的交互式、沉浸式体验。特别适合于移动 VR/AR 的应用。

### 5.3.5 新型传感技术

无处不在的传感技术是智能网络物理系统的关键技术,包括环境的 3D 成像、机器视觉技术等<sup>[51]</sup>。

3D 成像是一种能够测量视野内目标形状和位置的技术,在车辆控制和制导系统、无人机、智能家居、人机通信、手势控制和消费电子等领域具有巨大的潜力。这些应用要求相对较高的测量速率、较低的成本和微型化,与现代 CMOS 相机的实现方式相当。

机器视觉技术是依赖机器学习和人工智能开发用于计算机视觉和信号分析的技术,应用包括情感计算、人机交互和生物医学等,是感知交互物联网场景中的关键传感技术之一。

## 5.4 安全可持续技术

信息技术蓬勃发展的同时,通信网络的规模随之增大,人们对网络安全性提出更高的要求。而量子通信技术以及网络内生安全技术等会在 6G 网络安全中发挥重大作用。此外,无线能量传输技术是延长电池寿命、避免在某些条件下频繁充电的可行方法。

### 5.4.1 量子通信技术

量子通信<sup>[52]</sup>通过量子纠缠效应达到高效信息传输的目的,并且具有安全性保证,涉及量子密码通信、量子远程传态和量子密集编码等。

量子通信的显著优点在于高安全性以及高效率性。量子通信会对信息的传输进行加密,并且密钥是随机的,这使得破解信息很难;量子通信还有很强的抗干扰性、良好的隐蔽性能;此外,量子理论和 AI 的结合可以开发出更强大、更高效的 AI 算法,以满足 6G 对更高安全性的需求。

量子通信更适合将来 6G 网络中用于银行和政府部门的保密通信以及一些对保密程度要求极高的反导系统通信。

### 5.4.2 网络内生安全

当前保障网络安全的方式大多是依靠加密技术的,而这种方式来源于“补丁式”“外挂式”的思想。针对 6G 网络存在的各种不确定性安全隐患,传统的加密技术并不能抵抗泛在攻击。因此,6G 遵循“内聚而治”“自主以生”的思想,构建 6G 移动网络内生安全体系<sup>[53]</sup>。从基站、用户和边缘网

络 3 个层次,通过 6G 内生安全网络协议和组网机制,融合身份认证、接入控制、通信安全、数据加密等提供更高的安全性。

网络内生安全技术的优势有:使网络具有独立的驱动力,可以同步甚至预测性地感知并适应网络的变化,衍生网络内部强大的防御能力,达到身份真实、控制安全、通信可靠、信息可信的效果。

由于在智能电网、交通运输以及健康医疗等行业领域的安全性极为重要,未来 6G 网络内生安全技术将在上述领域有所应用。

### 5.4.3 无线能量传输技术

物联网中存在许多低功耗设备,如传感器、便携设备、可穿戴设备等。这些设备通常由电池供电,为维持运行要频繁充电和更换电池,人工成本很高,严重限制了网络的大规模部署和应用。无线能量传输(WPT, wireless power transmission)应运而生,即通过获取环境中的射频电磁波能量并转换成直流电为低功耗设备供电,其已在各类物联网场景中有广泛的研究<sup>[54-59]</sup>。

无线能量传输技术的优势:无线信号的射频能量可以为网络设备持续供电,使无线通信网络的生命周期以及服务质量得以提高,并且具有更高的可控性、稳定性以及自维护性。

在 6G 网络中,WPT 技术必定有更为广泛的应用,如便携式电子产品、机器人、无人机<sup>[60]</sup>等应用领域。

## 6 6G 面临的挑战

值得注意的是,6G 的研究还处于初级阶段,因此有很多问题待解决。未来 6G 网络中主要的挑战涉及一些技术性问题以及非技术性问题,如政策、规定等,具体如下。

### 6.1 物联网供电问题

移动通信网络中能源消耗占世界总消耗的一大部分,不仅增加碳排放也会增加很多成本。未来 6G 网络拥有超海量无线节点和传感器,将带来超高能耗的问题;另外,人工智能的算力应用广泛,6G 网络将处理海量的数据,计算复杂度与比特量很高,计算的能耗很大。因此,面对 6G 大规模的能量消耗,如何做到绿色节能通信是未来重要的挑战之一。

### 6.2 高精度定位技术

定位技术成为 6G 网络中的重要技术,然而

传统的 GPS 或者蜂窝定位方法存在一些问题。首先是泛在化问题, 针对室外复杂场景和室内异构设备场景, 采用融合定位技术, 目前尚未做到各场景泛在化; 其次, 无法提供大范围以及稳定的无缝覆盖; 最后, 定位的精度与环境紧密相关, 多径传播等对误差影响较大。综上, 目前的一些定位技术难以实现 6G 网络的高精度要求。因此, 对新型高精度定位方法的研究是 6G 网络要面临的挑战之一。

### 6.3 “超广泛在”通信网络

“超广泛在”通信网络, 即空天地海一体化网络。6G 网络将向空天地海空间不断延伸, 但是要满足随时随地的连接和通信需求, 达到任何人在任何时间、任何地点能够与任何人进行任何通信的效果, 就需要进一步扩大覆盖的深度和广度, 特别是在一些特殊场景中, 如隧道、沙漠、森林等。因此, 如何在通信网络中实现超广泛是 6G 网络需要面对的巨大挑战之一。

### 6.4 “超海量”接入

在 6G 万物智联时代, 机器类通信、大规模通信大量存在。到 2030 年, 将有上千亿部的移动终端要实现智慧互联, 到那时物联网的应用领域将扩展到各行各业, M2M 终端数量随之大幅增加。尽管 6G 网络可以使用更高的带宽, 但是多个终端设备接入网络需要非常强壮的多址接入方法和更好的动态分配机制等, 这也是目前很难做到的。因此, 如何满足超海量连接的物联网业务需求是 6G 网络面临的挑战之一。

### 6.5 超高峰值速率

随着时代的发展以及通信技术的进步, 人们对大流量应用 (AR、VR、触觉互联网、全息体验等) 的需求及万物互联速率的要求不断提升。尽管理论上太赫兹技术使得传输速率提高, 但是在实现上仍有诸多难点, 首先在 CMOS 中提高小型晶体管的速度技术难度大; 此外, 热效应、低击穿电压和有限的电池容量给实现超高峰值速率带来巨大的挑战。

### 6.6 网络安全问题

安全性是 6G 网络的一个关键问题。6G 网络 (物联网、人体局域网等) 将产生大量前所未有的信息, 涉及非常敏感的业务数据和个人隐私数据, 恶意的网络活动可能会导致财产甚至生命的损失, 而现有的安全技术不足以保证 6G 网络的安全。因此, 低复杂度和高安全级别的安全方法值得深

入研究, 这也是 6G 网络面临的主要挑战之一。

### 6.7 硬件设计问题

6G 网络在硬件设计方面的挑战是小型化现有大型高频发射和接收器<sup>[8]</sup>。高通公司和其他公司曾花费数年的时间将毫米波组件从米级 (如机场机身扫描仪) 缩小到指尖大小的调制解调器和天线。而对于太赫兹波段, 主要难点在于发明用于联合使用毫米波和太赫兹波段的的天线, 这使得射频收发机的高集成度设计更具挑战性。

### 6.8 农村互联互通挑战

YAACOUB 等<sup>[61]</sup>提出并分析了用于连接农村地区的前程和回程技术, 调查了农村地区可通过连接提供的主要应用程序或服务, 讨论了未来的趋势, 以及如何向农村地区提供基本连接。研究指出, 世界上大约一半人口生活在农村或贫困地区, 这些地区在电力供应、频谱分配、用户意识和经济方面问题较多。因此, 向这些地区提供连通性是一个重大挑战。

### 6.9 非技术性挑战

除了技术方面的挑战, 6G 网络的发展也涉及一些非技术因素挑战, 如政策法规、行业壁垒、消费者习惯以及经济成本等。例如, 频谱的分配与使用规则需要全球不同地区协调, 也需要不同行业领域间协调, 通过制定适合未来的频谱分配方案和许可法规, 为投资增加确定性和可靠性, 再如, 在卫星通信方面, 世界各国也要协调卫星通信的轨道资源等, 与此同时, 卫星通信在全球漫游切换方面也面临很大的挑战; 另外, 在空天地海一体化网络的建设和维护方面, 成本很高, 这些都是 6G 网络将面临的挑战。

清晰起见, 6G 网络关键技术优势、挑战及应用场景总结见表 3。

## 7 结束语

6G 网络将在目前兴起的 5G 网络基础上继承、革新、发展, 一方面弥补现有网络的局限性, 另一方面满足新兴信息业务和服务的需求。基于此背景, 本文从 6G 在工业界与学术界中的发展出发, 对典型应用、性能指标、网络架构、关键技术和挑战进行较为全面的阐述。如果说 4G 改变生活, 5G 改变社会, 那么 6G 使万物的连接延伸至智慧层面, 达到“人-自然-智慧”的连接与融合, 这将改变整个世界。

**表 3** 6G 网络关键技术优势、挑战及应用场景总结

技术分类	技术名称	优势	挑战	应用场景
新型频谱使用技术	太赫兹通信	传输速率极高、频谱资源更丰富	高传播损耗、电路设计	工业 4.0、全息通信
	可见光通信	超宽频带、安全性高、绿色低碳	覆盖范围有限, 需要射频上行链路	智慧交通、健康监控
	基于区块链的动态频谱共享	提高频谱利用率、降低成本、安全可靠	需要有统筹合理智能的算法支撑	大带宽、多模共存场景
高效无线接入技术	空间复用技术	提高传输数据数量、提高频谱利用率	高频率带来的收发器和天线设计、功效设计	高精度定位、环境感知
	极化编码技术	逼近香农极限、编译码复杂度和误码率低	将其引入非正交多址接入系统	编码调制、有记忆信道、监听信道
	全双工技术	提高复用能力、提高吞吐量	干扰管理、调度	低功率发射场景等
	智能反射面技术	增加接收信号功率、减小干扰、安全传输	智能反射面的部署, 对收发机硬件的影响	存在障碍物及小区边缘用户
	轨道角动量技术	多路复用并行以实现高频谱效率	波束合并和分离、电涡流信号的传输和接收	基站间的链路回传、终端间的近场通信
网络智慧使能技术	软件定义网络	高效控制网络、可靠性和安全性高	在物理和虚拟网络间部署和管理网络资源	用于 6G 无线网络体系架构
	意图驱动网络	预测故障自动修复、运维自动化	无线意图转译、意图组网实施	电力、金融、政府
	无线触觉网络	可以传递情感、提高网络沟通效率	将通信、控制和计算系统组合成共享基础设施	远程机器人控制、沉浸式虚拟现实
	分布式智能无线计算	智能更接近用户、延迟减少	跨网元跨区域有效实现计算和数据分析的分发	移动 VR/AR
	新型传感技术	可以提供超连接体验	需要 3D 成像和机器视觉支持	无人机、车辆控制系统
安全可持续技术	量子通信技术	计算效率高、安全性更强	现实条件下的安全性和远距离传输问题	银行和政府部门的保密通信
	网络内生安全	预测性感知网络变化、防御能力强	需要提供海量数据分析或流量监控的新算法	智能电网、交通运输、健康医疗
	无线能量传输	可控性、稳定性、自维护性高、供电持续	电磁干扰问题	便携式电子产品、机器人、无人机

**参考文献:**

[1] LIU G Y, HUANG Y H, LI N, et al. Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030[J]. China Communications, 2020, 17(9): 92-104.

[2] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.  
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 1-11.

[3] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.  
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.

[4] DAVID K, BERNDT H. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G?[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13(3): 72-80.

[5] ZONG B Q, FAN C, WANG X Y, et al. 6G technologies: key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 18-27.

[6] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.

[7] HEATH R W. Going toward 6G[J]. IEEE Signal Process, 2019, 36(3): 3-4.

[8] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G wireless communications: vision and potential techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 70-75.

[9] LETAIEF K B, CHEN W, SHI Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(8): 84-90.

[10] SAAD W, BENNIS M, CHEN M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 134-142.

[11] NAYAK S, PATGIRI R. 6G communication: envisioning the key issues and challenges[J]. EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 2021, 6(24): 166959.

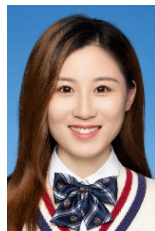
[12] LU Y, ZHENG X R. 6G: a survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2020, 19: 100158.

[13] PENCHEVA E, ATANASOV I, ASENOV I. Toward network intellectualization in 6G[C]//Proceedings of 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA). Piscataway: IEEE

- Press, 2020: 1-4.
- [14] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G 愿景与需求: 数字孪生、智能泛在[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 3-9.  
LIU G Y, JIN J, WANG Q X, et al. Vision and requirements of 6G: digital twin and ubiquitous intelligence[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 3-9.
- [15] MAIER M, EBRAHIMZADEH A, ROSTAMI S, et al. The Internet of no things: making the Internet disappear and “see the invisible” [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(11): 76-82.
- [16] MARTIN M, AMIN E. XR in the 6G post-smartphone era, in toward 6G: anew era of convergence[M]. IEEE, 2021: 167-182.
- [17] 李元杰, 董超, 牛凯. 面向 6G 的高分辨率无线信道频域仿真方法及定位技术研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 13-20.  
LI Y J, DONG C, NIU K. High resolution wireless channel simulation and localization technique for 6G network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(1): 13-20.
- [18] 朱伏生, 赖峥嵘, 刘芳. 6G 无线技术趋势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2020(12): 1-6.  
ZHU F S, LAI Z R, LIU F. Trend analysis of 6G wireless technology[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(12): 1-6.
- [19] 柴蓉, 邹飞, 刘莎, 等. 6G 移动通信: 愿景、关键技术和系统架构[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(03): 337-347.  
CHAI R, ZOU F, LIU S, et al. 6Gmobilecommunication: vision, key technologies and system architecture[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(03): 337-347.
- [20] 吴启宗. 6G 网络性能指标、关键技术及愿景分析初探[J]. 信息技术与信息化, 2020,(06): 153-155.  
WU Q Z. Preliminary study on 6G network performance index, key technology and vision analysis[J]. Information Technology and Informatization, 2020,(06): 153-155.
- [21] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [22] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update?[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2731-2735.
- [23] 熊轲, 胡慧敏, 艾渤, 等. 6G 时代信息新鲜度优先的无线网络设计[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 80-91.  
XIONG K, HU H M, AI B, et al. Information freshness orientated wireless network design for 6G[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 80-91.
- [24] ZHENG H N, XIONG K, FAN P Y, et al. Age of information-based wireless powered communication networks with selfish charging nodes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(5): 1393-1411.
- [25] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.  
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [26] 孙耀华, 王则予, 袁硕, 等. 智能内生 6G 网络: 架构、用例和挑战[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 8-13.  
SUN Y H, WANG Z Y, YUAN S, et al. The sixth-generation mobile communication network with endogenous intelligence: architectures, use cases and challenges[J]. Electronic technology application, 2021, 47(3): 8-13.
- [27] JIANG C X, ZHANG H J, REN Y, et al. Machine learning paradigms for next-generation wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 98-105.
- [28] HAN S F, CHIH-LIN I, LI G, et al. Big data enabled mobile network design for 5G and beyond[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 150-157.
- [29] 章嘉懿. 去蜂窝大规模 MIMO 系统研究进展与发展趋势[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(3): 285-292.  
ZHANG J Y. Overview of cell-free massive MIMO system[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(3): 285-292.
- [30] GUI G, LIU M, TANG F X, et al. 6G: opening new horizons for integration of comfort, security, and intelligence[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 126-132.
- [31] YAN L F, HAN C, YUAN J H. Hybrid precoding for 6G terahertz communications: performance evaluation and open problems[C]// Proceedings of 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [32] 迟楠, 贾俊连. 面向 6G 的可见光通信[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 11-19.  
CHI N, JIA J L. Visible light communication towards 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(2): 11-19.
- [33] 王威, 李祖广, 吴启晖. 基于区块链的动态频谱共享接入技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 26-34.  
WANG W, LI Z G, WU Q H. Dynamic spectrum sharing access technology based on blockchain[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 26-34.
- [34] 聂凯君, 曹槟, 彭木根. 6G 内生安全: 区块链技术[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 21-27.  
NIE K J, CAO B, PENG M G. 6G endogenous security: blockchain technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 21-27.
- [35] CHEN S F, ZHANG J Y, JIN Y, et al. Wireless powered IoE for 6G: massive access meets scalable cell-free massive MIMO[J]. China Communications, 2020, 17(12): 92-109.
- [36] LU Y, XIONG K, FAN P Y, et al. Optimal multicell coordinated beamforming for downlink high-speed railway communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9603-9608.
- [37] 陈旻, 董畅, 杜威, 等. 浅析极化码的原理及应用[J]. 数字通信世界, 2017(12): 7-8.  
CHEN M, DONG C, DU W, et al. Analysis of polar code principle and application[J]. Digital Communication World, 2017(12): 7-8.
- [38] Wang D, Wang M, Zhu P, et al. Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1464-1478.
- [39] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies[J]. IEEE Communications Mag-

- azine, 2020, 58(3): 55-61.
- [40] HASHIDA H, KAWAMOTO Y, KATO N. Intelligent reflecting surface placement optimization in air-ground communication networks toward 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 146-151.
- [41] 王兆瑞, 刘亮, 李航, 等. 面向 6G 物联网的智能反射表面设计[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 84-95.  
WANG Z R, LIU L, LI H, et al. Intelligent reflecting surface design for 6G-assisted Internet of Things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 84-95.
- [42] LIU J X, XIONG K, LU Y, et al. Energy efficiency in secure IRS-aided SWIPT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1884-1888.
- [43] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G 愿景及潜在关键技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 17-21.  
WEI K J, ZHAO Y, XU X Y. Analysis of 6G vision and potential key technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 17-21.
- [44] YUAN Y F, ZHAO Y J, ZONG B Q, et al. Potential key technologies for 6G mobile communications[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(8): 183301.
- [45] 王月, 吕光宏, 曹勇. 软件定义网络安全研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4):5.  
WANG Y, LV G H, CAO Y. Research on security of software defining network[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(4): 5.
- [46] 王蒙蒙, 刘建伟, 陈杰, 等. 软件定义网络: 安全模型、机制及研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(4): 969-992.  
WANG M M, LIU J W, CHEN J, et al. Software defined networking: security model, threats and mechanism[J]. Journal of Software, 2016, 27(4): 969-992.
- [47] 袁硕, 任奕璟, 王则予, 等. 软件定义的星地融合智能无线网络[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 66-77.  
YUAN S, REN Y J, WANG Z Y, et al. Software defined intelligent satellite-terrestrial integrated wireless network[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 66-77.
- [48] ANDREW L, JOE S, SANJIT G. Innovation insight: intent-based networking system: G00323513[S]. 2017.
- [49] 周洋程, 闫实, 彭木根. 意图驱动的 6G 无线接入网络[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 72-79.  
ZHOU Y C, YAN S, PENG M G. Intent-driven 6G radio access network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 72-79.
- [50] PROMWONGSA N, EBRAHIMZADEH A, NABOULSI D, et al. A comprehensive survey of the tactile Internet: state-of-the-art and research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 23(1): 472-523.
- [51] KATZ M, MATINMIKKO-BLUE M, LATVA-AHO M. 6Genesis flagship program: building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem[C]//Proceedings of 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-9.
- [52] 张庆秀, 郭孝尧, 孙宝权, 等. 量子通信与量子计算[J]. 半导体技术, 2002, 27(6): 8-9, 12.  
ZHANG Q X, GUO X Y, SUN B Q, et al. Quantum communication and quantum computing[J]. Semiconductor Technology, 2002, 27(6): 8-9, 12.
- [53] 刘杨, 彭木根. 6G 内生安全: 体系结构与关键技术[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 11-20.  
LIU Y, PENG M G. 6G endogenous security: architecture and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 11-20.
- [54] HU H M, XIONG K, QU G, et al. AoI-minimal trajectory planning and data collection in UAV-assisted wireless powered IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(2): 1211-1223.
- [55] HU H M, XIONG K, ZHANG Y, et al. Age of information in wireless powered networks in low SNR region for future 5G[J]. Entropy, 2018, 20(12): 948.
- [56] ZHANG R C, XIONG K, GUO W, et al. Q-learning-based adaptive power control in wireless RF energy harvesting heterogeneous networks[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 1861-1872.
- [57] XIONG K, FAN P Y, ZHANG C, et al. Wireless information and energy transfer for two-hop non-regenerative MIMO-OFDM relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1595-1611.
- [58] XIONG K, WANG B B, LIU K J R. Rate-energy region of SWIPT for MIMO broadcasting under nonlinear energy harvesting model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(8): 5147-5161.
- [59] LU Y, XIONG K, FAN P Y, et al. Global energy efficiency in secure MISO SWIPT systems with non-linear power-splitting EH model[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(1): 216-232.
- [60] 张立彤, 熊轲, 张煜. 无人机辅助无线能量收集雾计算网络优化方法[J]. 软件学报, 2019, 30(S1): 9-17.  
ZHANG L T, XIONG K, ZHANG Y. UAV-assisted wireless energy harvesting fog computing network optimization method[J]. Journal of Software, 2019, 30(S1): 9-17.
- [61] YAACOUB E, ALOUINI M S. A key 6G challenge and opportunity: connecting the remaining 4 billions: a survey on rural connectivity[EB]. 2019.

## [作者简介]



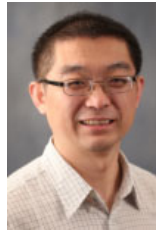
栾宁 (1996- ), 女, 北京交通大学计算机与信息技术学院硕士生, 主要研究方向为信息年龄、无线能量传输网络和 6G 网络等。



熊轲 (1981- ), 男, 博士, 北京交通大学计算机与信息技术学院教授、副院长, 主要研究方向为无线协作网络、无线移动网络和网络信息理论等。



张煜（1983- ），男，博士，国网能源研究院有限公司高级研究员，主要研究方向为边缘计算、无线协作网络和能源互联网等。



屈钢（1969- ），男，博士，马里兰大学帕克分校电气和计算机工程系教授，马里兰州嵌入式系统和硬件安全实验室主任、无线传感器实验室主任，IEEE Fellow，主要研究方向为超大规模集成电路知识产权重用和保护、硬件安全、低功耗系统设计、人工智能和无线传感器网络。



何睿斯（1987- ），男，博士，北京交通大学教授，主要研究方向为无线信道建模与 5G 通信技术。



艾渤（1974- ），男，博士，北京交通大学教授，轨道交通控制与安全国家重点实验室常务副主任，IEEE Fellow，主要研究方向为宽带移动通信和轨道交通专用移动通信。