

6G

无界, 有AI



©紫光展锐 版权所有

6G 白皮书

紫光展锐中央研究院

2020 年 11 月 10 日



目录

1. 前言.....	1
2. 6G 趋势、应用场景与需求.....	3
2.1. 6G 趋势.....	3
2.1.1. 无界.....	3
2.1.2. 有 AI.....	5
2.2. 6G 应用场景.....	9
2.2.1. 全息通信.....	9
2.2.2. 沉浸式 XR.....	10
2.2.3. 数字孪生.....	11
2.2.4. 全域无缝覆盖.....	13
2.2.5. 全自动驾驶.....	14
2.3. 6G 需求.....	15
2.3.1. 系统性能指标.....	15
2.3.2. 6G 终端芯片技术需求.....	17
3. 网络架构的演进.....	21
3.1. 以用户为中心的全空间网络架构.....	22
3.1.1. 以用户为中心.....	22
3.1.2. 空天地一体化.....	23
3.2. 泛在算力网络.....	24
3.3. 安全可信的网络架构.....	25
4. 6G 核心技术.....	27
4.1. 太赫兹通信技术.....	27
4.2. 可见光通信技术.....	29
4.3. 全双工技术.....	31

4.4.	增强 MIMO 技术.....	32
4.5.	先进调制编码技术.....	34
4.6.	非正交接入技术.....	35
4.7.	星地协同传输技术.....	37
4.8.	AI 辅助通信.....	37
5.	总结.....	41
6.	参考文献.....	43

1. 前言

烽火、马拉松、驿站等信息传递方式伴随人类走过了几千年的历史。

19 世纪，麦克斯韦、赫兹、马可尼、波波夫等先辈完成了无线电从理论、实验证明到工程化应用等一系列突破，人类首次打破空间束缚并实现了准实时的信息交流。

20 世纪四五十年代，贝尔实验室的科学家们奠定了现代信息系统发展的两大基石：香农、Ring & Young 的信道容量公式及蜂窝概念至今仍在指引移动通信系统的发展；John Bardeen、William Shockley、Walter Brattain 发明的晶体管更是现代所有信息系统的工程实现基础。

现代移动通信系统真正融入普通大众的日常生活始于 1980 左右，发展过程中也被赋予了“代际（Generation）”的概念。从第一代系统（1st Generation, 1G）的语音，2G 的语音与数据，3G 的多媒体到 4G 的富媒体，移动通信系统以每代 10 年的更迭节奏伴随我们度过了四十多年，不断拓宽的信息高速公路带来了人类社会前所未有的加速发展。

站在 2020 年，回望过去十年，4G 的普及彻底改变了我们的社交、娱乐、购物、饮食等生活方式；遥望下一个十年，5G，按其被赋予的使命，也将渗透到生产、交通、医疗、能源、金融、教育等社会生产的各个角落，革命性地改变人类社会基本运行方式。

发展永无止境，5G 之后，6G 该如何被构画？用什么样的技术去打造？将如何进一步影响人类社会的发展？本白皮书将分享紫光展锐的部分观点。

4G 改变生活，5G 改变社会，6G 将重塑世界。

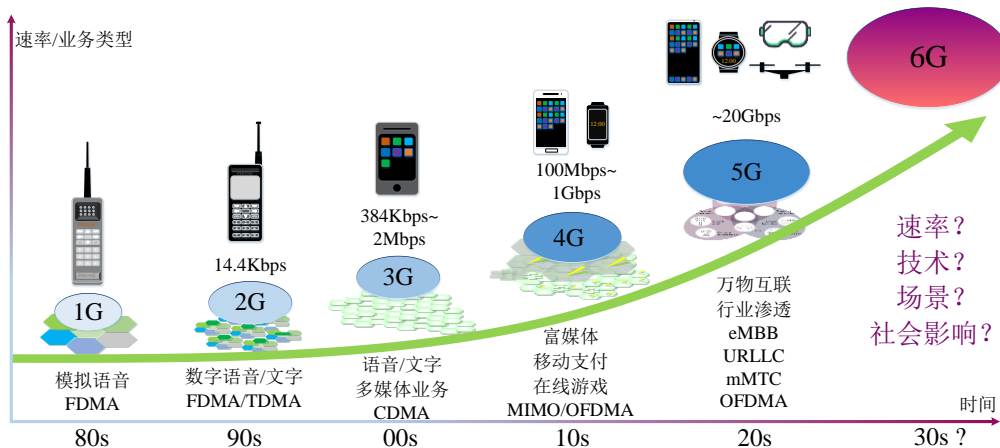


图1. 通信系统演进

2. 6G 趋势、应用场景与需求

在需求和技术的双重驱动下，6G 不再只是通信技术的增强演进，而是通过通信技术与信息技术、数据技术及人工智能（Artificial Intelligence, AI）等技术的深度融合，由移动通信网络发展为移动信息网络。

2.1. 6G 趋势

6G 移动信息网络将极大的打破传统信息交互的界限，突破信息触达的边界，智能无处不在，构造一个“无界，有 AI”的未来世界。

2.1.1. 无界

技术的不断发展和信息化的不断普及将把 6G 技术应用到更多领域。一方面，通信产业与其他行业领域的壁垒界限将逐步被打破直至消失；另一方面，通信能力本身也将突破原有能力限制，随着应用范围的扩大而不断提升。6G 势必把各个产业带入继引入计算机信息化之后的第二个春天。

■ 宏观与微观的联接

自人类诞生以来，人们对天空和远方的想象，留下了无数的神话，显微镜的发明又打开了微观世界的大门。人们既可以借助科技的翅膀，实现“可上九天揽月”的梦想，又可以透过科技的眼睛，验证“一花一世界”的哲思。6G 技术也在沿着这一思路在宏观和微观世界分别展开探索。一方面，以地面移动通信和卫星通信为基础，构建空天地一体化通信系统，实现从地面到天空的扩展。另一方面，以纳米级传感器、物联网等技术为基础，构建实时感知和监控系统，实现高效精确的健康监测和病理研究。

■ 虚拟与现实的融合

“庄周梦蝶”是虚拟与现实的交织，是对主观与客观认识的一种哲学思考。我们所认为的现实，都是通过各种感觉器官获得的，模拟人类五种感官的不同感受是实现虚拟和现实融合的关键。借助于虚拟现实（Virtual Reality, VR）、增强现实（Augmented Reality, AR）及 6G 网络技术，不仅视觉和听觉信息可以被数字化，触觉、味觉和嗅觉信息将来也可以在一端被采集和数字化，通过网络传输，并在另一端完整复现，提供给用户完全沉浸式的体验，实现虚拟与现实的完全融合。

■ 数字与物理的映射

得益于通信、感知、计算、存储等技术的进步，当前人们已经有能力针对物理世界中的部分物品或较小的系统重构出一个数字孪生体。随着 6G 时代的到来，复杂的大型物理实体

可以被精细数字化建模，并且物理实体和数字模型进行信息交换实时互动。借助大数据处理和 AI，在数字世界进行推断和预测，让人们打开“上帝视角”，实现对物理世界的先知先觉。数字世界与物理世界将不再是泾渭分明的两个世界，而是可以相互映射、相互影响的孪生世界。

■ 过去与未来的穿越

随着虚拟现实及通信网络等技术的进步，尤其是计算机动画、全息和沉浸式 XR（Extended Reality）等技术的快速发展，使得我们可以对某些已经消失或尚未出现的事物进行还原和构建，也可以对当前的事物进行全息式的保存。无论是逝去的人还是消失的物，无论是波澜壮阔的战争还是灿烂辉煌的文明，无论是浪漫美妙的太空遨游还是惊险刺激的星际穿越，都可以得到最真实的还原和最完整的呈现。在某种意义上，过去、现在和未来不再是一条不可逆的单向线，人们可以随意地进行“时间旅行”，体验百味人生。

■ 技术与需求的匹配

6G 信息网络将是一个通过各种技术手段按需提供资源和服务的网络。

● 多层次融合通信

6G 网络实现的从微观到宏观的空间全覆盖，不是不同网络体系的孤立运行，也不是不同网络体系简单的互联互通，而是一种深度融合的多层次一体化通信体系。多层次融合通信的发展，需要从业务、频谱、网络架构、核心技术等方面进行深度融合，结合灵活的组网模式，构建多层次一体化通信系统，实现统一高效的资源调度与网络管控。

● 全维度人机交互

人机智能交互致力于实现人与机器间进行传统五大知觉（视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉）以及人类思维感情的全方位立体智能交互。机器要有全感官信息接收识别能力和人类可辨识的知觉制造能力，并且要求该能力能够做到精细化和抗干扰化。例如，机器视觉除对人和物进行分类识别和判断外，还可以对手势、体态、表情和眼神等进行智能判断；机器听觉除了对标准语言的精确识别，还要解决噪声、口音、多语言混杂等复杂场景的精确识别。除了传统的五感交互之外，人类思维感情的交互是更加高级的应用，让人和机器之间做到“心有灵犀”，提升人们的智能化生活体验。

● 全资源灵活调用

由于用户需求多样且差异化显著，6G 对频谱、计算、存储等资源的需求不仅是总量的提升，还要具有灵活调度分配能力。在 6G 网络中，频谱接入的趋势是低频段为基础，高频段以按需方式开启，实现低频段、毫米波、太赫兹与可见光多频段共存与融合组网，在覆盖、速率、安全等方面满足不同的用户需求；计算资源将遍布整个系统，计算任务可

以在终端、边缘节点、云端等实现灵活、实时的分割、下放和卸载，匹配不同节点的计算能力和能效需求；存储资源将更加丰富，除了用户终端和服务器，各类个人云、企业私有云和公有云等也将全面发展，依托高速率低时延的 6G 网络显著降低单个节点尤其是终端节点的存储压力。在不断丰富的频谱、计算和存储等资源前提下，基于灵活的资源调度分配，未来的 6G 可以随时随地满足用户的极致需求。

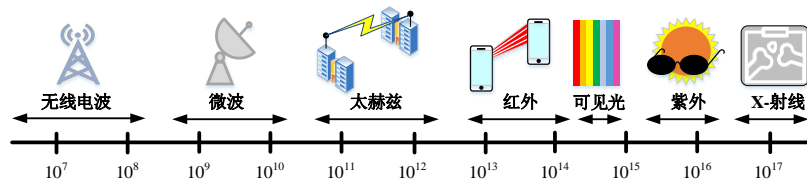


图2. 全频谱接入

2.1.2. 有 AI

“AI”，作为热点词汇，承载了 6G 所具备的两大特征。首先，从信息技术角度，AI 是人工智能的英文缩写。AI 技术相关业务，如语音图像识别，智能情感交流等，是 6G 网络的重要应用。与此同时，AI 技术也可对 6G 网络进行设计优化，进而提升网络性能和用户体验。其次，从社会人文角度，AI 也是汉字“爱”的发音。6G 技术将为发展全球经济，消灭贫穷、饥饿和不平等提供新的解决方案，创造一个更加有爱的世界。

2.1.2.1. 智慧的 6G 技术

深度学习算法的快速发展、海量数据获取渠道的增多以及硬件计算和存储能力的显著提升使得 AI 技术在近些年来呈现爆炸式的发展，并在语音识别、图像识别、情感交流等多个领域取得突破。

AI 的发展不仅在消费电子领域给人类带来丰富多彩的各种应用，也在教育、交通、家居、医疗、零售和安防等多个行业有广泛应用，促进各个行业产业升级。与此同时，6G 的高速率、低时延等特性可以很好地为基于 AI 的应用提供通信能力保障，尤其为分布式 AI 技术应用提供更多可能，让更多分散的低计算能力单元能够高效实时协作，实现万物智联。

除了 6G 网络支持 AI 应用，AI 技术同样也在给信息网络带来新的变化。5G 网络已初步采用 AI 技术来进行网络优化、资源分配和干扰协调等。在未来的 6G 网络中，通信与 AI 将会更加深度融合，围绕网络部署、运维管理、资源配置、移动性预测和空口设计等各层级进行系统设计和性能优化。

■ 6G 联合 AI 实现行业再造

目前人们已经在医疗、交通、工业等领域对 AI 进行了积极的探索。可以预见，随着 AI 与行业的深度融合，越来越多的 AI 行业应用正在被发掘或拓展，同时 AI 行业应用对网络

性能的需求也不断提升。6G 技术可以提供极致的通信服务体验。在医疗行业，AI 辅助诊疗/癌症诊断、医疗影像智能识别等需要高质量的影像数据传输；医疗机器人需要低时延高可靠的数据传输；个人健康的大数据智能分析需要大量的体域网传感器终端的数据传输和海量的终端连接。在交通行业，AI 技术应用在智慧桥梁健康监测与运维管理，智能航道技术、智慧码头、无人驾驶以及无人机配送等方面。基于大量传感器和机器人的检测数据收集，事故问题定位以及移动轨迹预测是这些领域的突出需求。在工业制造行业，AI 在设计仿真、个性化生产以及质量监控等多个环节均有所应用。对于仿真设计，基于 VR、AR 技术进行数据传输时，需要高质量的影像数据传输通道；对于个性化生产和质量监控，工业互联网积累的大量且有价值的生产数据，需要低时延高可靠的传输通道。图 3 给出了 AI 应用在医疗、交通和工厂领域对不同通信指标的需求。

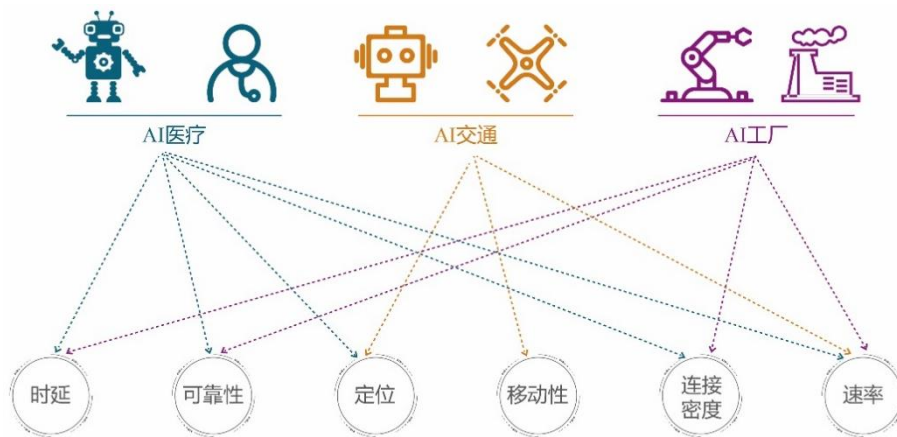


图3. AI 应用的性能需求

■ AI 助力 6G 网络智慧成长

未来的 6G 系统是智慧化的通信系统。基于深度学习^[1]和联邦学习^[2]等算法的 AI 技术，可以用于解决 6G 通信中那些复杂度较高的难以建模与求解、最优检测和估计以及功能模块的联合优化等问题。具有自学习功能、联想存储功能和高速寻找优化解能力的 AI 算法，可以为大规模天线、无线资源分配、信号检测技术、信道编解码等技术提供更优的设计和配置。此外，传统通信网络规划部署及运营维护严重依赖人工经验，面对 6G 时代成百上千关键指标的联合优化，需要 AI 技术为其提供加持。

借助 AI 技术，可以全方位打造智慧内生的 6G 网络。终端借助 AI 技术可以分析用户行为习惯，智能动态地实现终端资源的调用和休眠；接入网借助 AI 技术可以降低空口时延和开销以及提升频谱效率；核心网借助 AI 技术可以根据业务需求实现智能网络部署与管理，打造绿色节能网络。

借助 AI 技术，可以全方面打造安全内生的 6G 网络。面对不断变化的网络威胁，任何不变或被动的安全体系都面临着极大的风险，6G 必须打造自适应、自主和自成长的安全能力才能实现安全内生，降低网络攻击风险，保证业务安全。借助 AI 技术，网络系统可以不

断从信息化系统中进行学习,自我成长。在面对一般的网络攻击时能够自我发现和自我修复;在面对大型攻击时能够自主预测、自动告警并自动采取应急措施;在面对极端网络灾难时,也能及时启用容灾系统,保证关键业务不中断。

在未来,6G 系统将作为 AI 的管道来承载 AI 应用,而 AI 也可以助力 6G 系统实现全面优化。

2.1.2.2.有爱的 6G 世界

未来整个社会将会在政治建设、经济建设、文化建设、社会建设和生态文明建设等方面协调发展,实现五位一体总布局。联合国也提出了无贫穷、零饥饿、良好健康与福祉、优质教育等与政治、经济、文化、社会和生态文明等息息相关的 17 个可持续发展目标,如图 4 所示。移动通信网络作为信息化建设的重要组成部分,已成为社会发展的战略性公共基础设施,6G 作为面向 2030 年的新一代移动信息网络,在整个社会发展的方方面面都具有举足轻重的地位。



图4. 联合国可持续发展目标^[3]

■ 政治

人类社会对自身的治理方式各有理解,求同存异是当前世界的主流。5G 标准技术的全球统一让全世界人民在求同上又前进了一步,6G 的发展将继续促进这个大趋势。

信息技术的广泛应用,对每个国家的政治生活带来深刻影响。目前政府正在大力推动信息化改革,打造“智慧政务”,应用现代信息和通信技术,将管理和服务通过网络技术进行集成升级,提高政府的工作效率、决策质量、调控能力,全方位地向人们提供超越时间、空间的优质、规范、透明、高效的服务。6G 更全面的信息获取,方便的信息分享,将进一步推动治理能力、方式的革新。

■ 经济

经济发展是当今世界的主旋律，联合国可持续发展的第一目标就是在全世界消除一切形式的贫困。当前世界经济处于快速发展当中，但不断的自然灾害每年造成的直接经济损失高达数百亿美金。2020年一场突如其来的新冠肺炎导致全球数十年贫困人口首次增加，在2020年有7100多万人陷入极端贫困^[4]。

信息、通信和数据技术（Information Communications and Data Technology, ICTD）融合，加深社会信息化的程度，深刻影响每个产业的发展，促进传统产业不断改造、升级和转型，同时又衍生触发许多新的产业。6G与垂直行业的融合，可以充当行业发展的“助推器”，对行业发展方式和经济结构调整有着重大的引领和带动作用。

6G可以促进工业离散专网逐步向统一公网发展，可以实现全量连接、全局智能的柔性生产和无人化、智能化远程控制，助力工业4.0全面落地，实现工业产能大幅增加，经济飞速发展。全面智能化的工业在面对全球疫情等问题时也不会受到明显影响。

6G技术应用到传统农业中，基于传感器和物联网技术实现农业生产环境的智能感知、智能预警、智能决策、智能分析，为农业生产提供精准化种植、可视化管理和智能化决策，是发展中国家消除贫困，利用后发优势实现经济发展后来居上的有效途径之一。

■ 文化

时代的进步伴随着文化的演进，在6G万物智联的大背景下，整个社会文化会发扬其更加“人性化”一面。通过6G通信的支撑，可以实现人与人之间随时天涯咫尺，尤其是伴随着全息通信等技术的成熟，远隔千里的人们也可以实现面对面的陪伴，让亲人不再因距离而感到孤单，让朋友不再因距离而逐渐疏远。在这样的高度信息化和智能化的社会环境下，会催生大量新的文化形式和文化内容，新的文化形式和内容具有新的文化价值和社会价值，深远而长久地影响整个社会。

此外，在整个社会的发展中，有许多优秀的文化因为传承的断绝被淹没在历史的长河中，是人类精神财富的一大损失。优秀的文化是需要传承和发扬的，而文化的传承和发扬是需要有媒介的。随着科技的发展，能够充当文化传承和发扬的媒介越来越丰富，从竹筒到纸张，从磁带到磁盘，形式也越来越丰富，从文字到语音，从静态到动态。在未来的6G世界中，借助全息、XR等技术，文化，包括非物质文化遗产可以跨域时间和空间，以最真实的一面得到传承和发扬。

■ 社会

人们的生活离不开衣食住行，衣食住行的发展直接影响人们的生活质量。未来的衣食住行不仅是满足人们的基本需求，更要满足人们更高的生活追求：衣服不仅是舒适美观，更要智能个性；食物不仅是营养饱腹，更要美味健康；居住不仅是遮风挡雨，更要温馨和谐；出行不仅是便捷高速，更要安全舒适。

一个可持续发展的社会，需要确保健康的生活，增进各年龄段人群的福祉，需要确保包

容和公平的优质教育，让全民终身享有学习机会，更要减少因地域差异和发展不平衡导致的医疗和教育不公平。通过 6G 连接，先进医疗资源和优质教育资源可以到达任何一个角落，实现即便身处偏远山区，也能享受到发达城市才能享受到的医疗和教育，让医疗和教育资源更加公平。以远程医疗为例，大型手术一般需要在在大医院才能进行，医疗专家的缺失是重要因素之一，基于 6G 网络，借助 VR 或全息通信等技术打造的远程医疗系统，可以进行实时远程手术，弥补偏远山村医护资源的不足。

■ 生态文明

目前整个世界还在不可持续地使用自然资源，一方面部分资源面临匮乏的危机，另一方面，各种不合理的使用方法造成资源的污染。为了建设可持续发展的生态文明，我们需要保护和管理生态系统，可持续地利用自然资源，以促进可持续发展。

基于物联网的数字化监管平台，结合大数据、视频云、6G 和 AI 等，可以全面检测环境变化，并自动识别监控目标和状态分析。通过对水质、土壤、气温、空气质量等的全方面测量和分析，对环境变化做出预警，并针对性的采取有效措施。

此外，在传统行业升级改造过程中，借助丰富的传感器及物联网设备和技术，可以有效改善传统行业对环境的污染。以智慧农业为例，基于对土地、气温等的检测，可以指导浇水，施肥，播种或收获的最佳时间，也可以及时检测瘟疫、精准喷洒农药，从而减少疫情发生和环境污染的出现。

总体来说，一个更有“爱”（ai）的世界，应该是一个合作共赢、规范高效的世界；应该是一个消灭贫穷、消除饥饿的世界；应该是一个文化多彩，精神富足的世界；应该是一个安全和谐、公平公正的世界；应该是一个绿色环保、持续发展的世界。通过 6G 的支撑，可以实现一个政治更加和谐，物质更加丰富，文化更加多元，社会更加公平，环境更加美丽的有爱世界。

2.2. 6G 应用场景

6G 将实现全应用场景覆盖，除了对 5G 原有的应用场景继续增强和演进，还将催生出全新的应用场景，提升生产效率，提高生活品质。

2.2.1. 全息通信

全息技术是一种通过录制物体的三维图像，网络传输并最终在目标空间内呈现出具有立体视觉效果的影像方法。真实的三维立体观感的产生，需要在显示时满足人类观察现实中三维物体的所有视觉线索（颜色、强度、深度等），并尽可能自然地呈现。理想的全息显示应该是基于裸眼实现的，在必要的时候，也可以借助头显并通过 AR/VR 等技术辅助实现。

全息技术的具体应用分为静态全息、动态全息、实时全息和交互全息等，其中真人尺寸

的实时交互全息是全息通信最为典型的一个应用，如图 5 所示。



图5. 实时全息通信

不同类型的全息应用对网络的需求差异较大，具体如下：

- (1) 传输速率：入门级的点云（Point Cloud）传输速率只需要几十 Mbps 即可，依赖 AR/VR 的全息显示或者光场 3D 交互的全息通信，对传输速率的需求在 Gbps 量级，而正常人类大小的真正实时全息通信对传输速率的需求在 Tbps 量级^[5]。
- (2) 时延：对于涉及到实时显示或实时交互的全息应用，对时延有严格的要求。特别的，在部分需要触觉信息传输的全息应用中，对时延的要求将会达到亚 ms 级。
- (3) 同步：在整个全息通信实现中，从录制、传输到显示可能由多个部分组成，比如一个地方的不同摄像机或多个地方的不同摄像机进行录制，经过不同的通信链路传输到目的地，通过多个设备进行显示。此时通信系统需要经过严格的同步，普通多媒体数据流的同步精度大概在 ms 级，而视觉、听觉、触觉信息的同步精度需要达到 ns 级。
- (4) 其他需求：安全、可靠性和计算能力在全息通信中也是需要重点考虑的关键需求。

对于终端来说，除了基带处理能力需要进一步提升外，在终端显示能力（4K、8K 视频播放）和终端计算能力（解码、渲染、AI）方面也具有较大挑战。此外，在终端形态上，除了手持终端外，头戴式终端或者壁挂式终端等不同形态的终端都将会在不同的全息应用中发挥各自的优势。

2.2.2. 沉浸式 XR

XR 既可以产生一个三维空间的全模拟世界，实现对现实世界的“虚拟”，又可以将虚拟物体或其他信息实时定位叠加到真实世界中，实现对现实世界的“增强”。沉浸式 XR 是 XR 发展的终极目标，通过对视觉、听觉、触觉等感官信息的完全模拟和实时交互，可以给

用户创造身临其境、感同身受的逼真体验，如图 6 所示。



图6. 沉浸式 XR

沉浸式 XR 对网络的需求主要体现在传输速率、时延和同步精度等方面，具体需求与全息通信类似。

沉浸式 XR 对终端的要求较高，新型的 XR 终端需要满足轻质、高分辨率/高刷新率显示、高保真/3D 定位音频及真实触感反馈等要求，此外，还需在智能交互方面进行增强。

从视觉角度说，终端需要同时满足极高的分辨率（4K、8K 或更高）以逼近现实世界及避免“纱窗效应”，较高的刷新率（60Hz、90Hz 或更高）以保障足够的动作流畅度，足够大的视场角(Field of View, FOV)以提升沉浸感，同时还要有足够低的 MTP(Motion To Photon) 时延，以降低用户眩晕感等。

从听觉角度说，现实世界中人们可以通过声音辨识出声源的大致方向和距离，使用 XR 达到这一点，需要终端具备高保真音频以匹配人耳听力和 3D 定位音频以保证在用户头部转动时动态调整 3D 环绕声，以提供给使用者与现实世界相同的感受。

从触觉角度说，沉浸式 XR 需要提供实时的真实触感反馈，这需要依赖智能手套、衣物等来模拟出不同的触感并实时反馈到用户接触面，提升用户的沉浸感。

对于沉浸式 XR 来说，如果将渲染任务全部放在终端上，对终端的能力和功耗会带来极大的挑战。沉浸式云 XR 可以解决一部分问题，即将复杂数据处理等功能云化，利用云端对模型进行渲染，提升模型精细度，而终端只负责采集和播放视频流。此时对终端本身的能力要求有所降低，但对于网络的要求会进一步提升，借助于更高速率、更低时延的 6G 网络，沉浸式 XR 的云化可以得到质的提升。

2.2.3. 数字孪生

数字孪生，即物理世界的实体在数字世界中实时复现。小至一个人体，大至一座城市，都可以使用数字孪生技术构建数字孪生系统，基于丰富的传感器和物联网技术可以对系统状

态进行精确感知，基于 AI、大数据分析技术可以对系统状态进行判断、预测和优化等。借助数字孪生，数字世界和物理世界相互映射并交织在一起，构建出一个可监控可管理的信息物理世界。在众多的数字孪生应用中，数字孪生体域网和数字孪生城市最具代表性。

数字孪生体域网借助各类可穿戴设备和生物传感器对人体的器官状态、生命体征进行监控，构建出一个数字化的人体，如图 7 所示，用于健康检测、病理研究及手术辅助。

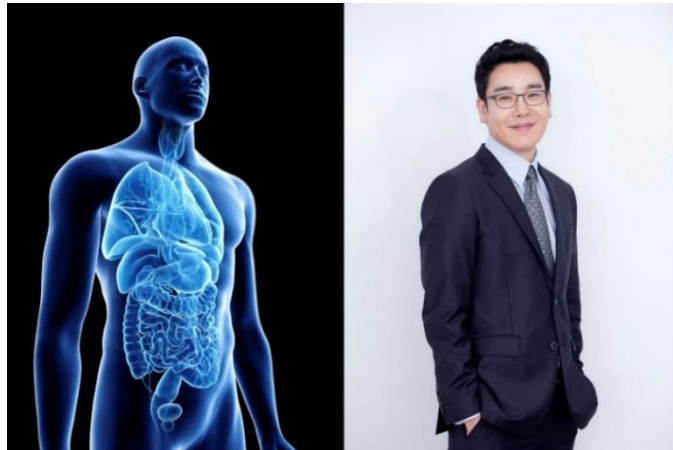


图7. 数字孪生体域网

城市是一个极度复杂的系统，由人、基础设施和大量的事件等组成，通过使用数字孪生技术，整个城市映射到数字世界中，如包括物理世界中的水/电/燃气等资源供给系统，学校/医院/社区/道路等城市基础设施和实时的人群活动和事件等。数字孪生城市可以辅助城市管理者在问题发生之前，基于某些策略进行模拟预测，防止可能的问题发生，也可以在问题发生后，迅速规划出最优的解决方案。



图8. 数字孪生城市

整体来说，数字孪生对网络的需求体现在如下几个方面：

- (1) 传输速率：数字孪生在构建虚拟化对象初期及使用 XR 对大型数字孪生实体进行可视化交互时，需要较高的数据传输速率。
- (2) 连接数：数字孪生需要大量的传感器实现精确的感知，对于部分关键区域，每平方米或每立方的连接设备数可高达 10^7 个。

- (3) 时延：为了保证能对物理世界能够及时做出预测或判断，数字世界和物理世界的数
据交换应当尽可能快，对于关键任务，可能需要低至 ms 级的时延。
- (4) 移动性：以数字孪生城市为例，大部分基础设施都是不具有移动性的，而对于市民、
汽车、地铁等，存在高移动性或群移动性，在数字孪生中，也需要灵活、按需支持
高度差异化的移动性。

此外，在数字孪生中，安全和隐私会成为比较尖锐的问题，需要考虑端到端的安全设计。
同时，对于庞大的异构数据难以依靠人工进行处理，此时 AI 会在数字孪生中扮演重要角色。

在数字孪生中，终端呈现多样化，从手持终端、可穿戴设备及消费物联网设备等面向消
费者的终端到智能机器设备、多智能体系统及微型传感器等面向工业的终端无所不包，满足
不同的需求。

2.2.4. 全域无缝覆盖

借助卫星网络实现全球范围内尤其是海洋、荒漠等人迹罕至地区的全域无缝覆盖，是目
前移动通信发展的重要方向。在 5G 时代，卫星通信和空间通信作为地面通信的补充，能够
满足广域覆盖的要求，实现业务层面的互联互通。但是，面向未来广域智能连接与全球无缝
宽带接入等迫切需求，在 AI 技术、云技术、卫星技术、运载技术等技术快速发展的驱动下，
空间网络与地面网络需要从业务、体制、频谱、系统等不同层次进行融合，构建全域无缝覆
盖通信系统，如图 9 所示，实现统一高效的资源调度与网络管控。

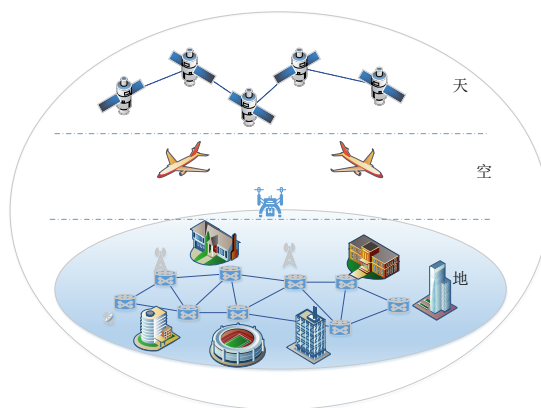


图9. 全域无缝覆盖

全域无缝覆盖场景将为广域的智慧对象建立智能连接，提供智慧服务，为人类提供全球
无间断的和一致性的信息服务。全域无缝覆盖主要有四大类型的具体应用：广域宽带接入、
广域物联网接入、广域时敏连接和广域高精度定位。广域宽带接入是指为偏远地区人口、飞
机、无人机、汽车等提供宽带接入，缩小数字鸿沟；广域物联网接入是指为农作物监控、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、无人区探险/探测等场景提
供接入；广域时敏连接是指为远程智能机器作业等时延敏感场景提供网络连接；广域高精度

定位是指为远程智能交通提供精确导航，以及为远程作业提供高精度定位。

实现全域无缝覆盖，主要有如下需求：

- (1) 卫星侧速率能力：在地面移动通信飞速发展的同时，卫星通信虽然借助于毫米波，具有较大的可用带宽，但由于频谱效率低下，通信速率与地面移动通信或光纤通信相比具有较大差距。在实现全域无缝覆盖的技术研究中，提升卫星侧的频谱效率是重点突破的方向。
- (2) 时延：卫星通信相对于地面通信一个显著的差别在于传播时间长，因此尽量减少端到端时延是目前实现全域无缝覆盖需要重点考虑的问题。
- (3) 计算能力：由于星上功率受限，卫星的数据处理能力受到限制，对于重大的边缘计算任务可能不能胜任，但是可以考虑轻量级的边缘计算，以改善用户体验。

面向未来全域无缝覆盖的通信系统，卫星通信终端和地面通信终端也在朝着一体化的方向发展，主要有两大特征：

- (1) 泛在化：是指要求终端支持全频段，具有卫星接入、地面接入等多种接入模式，能够以综合最优的方式选择接入资源，实现全域无缝接入。
- (2) 智能化：是指终端具备 AI 的能力。一体化终端通过随时随地的网络连接与云端协作，并借助于高性能的本地智能处理能力满足用户的极致体验，实现广域的智能感知、智慧控制和智慧服务。

根据系统的应用场景和业务特点，一体化通信终端主要有三类：提供连接接入服务的接入节点终端、提供全球无缝互联网接入服务的个人手持终端和为远程智能对象建立智能连接的物联网终端。与传统地面通信终端一样，一体化通信终端需要具备传统的传输能力、定位能力、感知能力、AI 能力、计算能力等。此外，由于全域无缝覆盖通信系统具有空间节点高度动态和系统时空尺度极大等特点，对通信终端的接入能力、星历推算能力、天线增益、低信噪比接收能力、快速切换能力、定位精度等方面也提出了更高的要求。

2.2.5. 全自动驾驶

全自动驾驶是汽车工程学会（Society of Automotive Engineers, SAE）定义的 Level-5 级自动驾驶水平，是指由车辆完成所有驾驶操作，人类驾驶员无需保持注意力。全自动驾驶的实现依赖于车本身的单体智能和车联网技术构造的群体智能。全自动驾驶是实现智能交通的重要手段，也是人们生活高度智能化程度的一个重要特征。

目前自动驾驶已经得到了全社会的关注并取得了部分进展，但距离实现全自动驾驶还有相当长的路要走。实现全自动驾驶，需要依赖于网络技术、AI 技术及各类传感技术等共同进步，且需要有更多的政策支撑。对于车联网技术本身，随着 4G/5G/6G 的不断演进，为

实现自动驾驶提供更加优质的网络技术支持。在实现自动驾驶后，车对于人来说，不再只是一个交通工具，更是一个办公场所或娱乐休闲场所，驾驶员可以彻底释放双手双脚，将更多的时间和精力投入到其他自己喜欢的事情上，如图 10 所示。



图10.自动驾驶

自动驾驶在网络方面除了车联网技术本身对时延、可靠性等方面的持续演进，AI 的在线训练、实时更新等也对时延、速率等方面有新的需求和挑战。其中在车联网技术中，低时延和高可靠是保证车辆安全的重要因素，可以依赖于路边设备实现超过目前车联网的性能，即低于 1ms 的传输时延和高于 99.999% 的可靠性。

此外，在全自动驾驶的实现中，感知、通信、计算一体化是必不可少的。借助先进的 AI 算法，根据感知信息、设备状态及网络环境，实现个性化的行车规划，提升出行效率和保障出行安全。

2.3. 6G 需求

随着 6G 应用场景的不断丰富，要在同一个网络系统中满足差异化的需求，对于网络存在极大的挑战。6G 网络从整体上需要能够随时随地满足所有用户的极致需求，即提供以用户为中心的全域无缝覆盖和按需服务的能力。另外，6G 还需要做到灵活高效、智慧安全，节约部署和运营成本。

2.3.1. 系统性能指标

历史上每一次移动通信技术的更新换代，在大多数性能指标上都会有十倍到百倍的提升，包括峰值速率、体验速率、网络容量、时延、可靠性、移动性、连接密度、定位精度等等，6G 系统需要满足所有场景下的极致需求，在各个性能指标上也需要有大幅度的提升。

综合各个应用场景及业界的主流观点，在传统的性能指标上，6G 相对于 5G 整体上呈

现 10~100 倍的提升，如图 11 所示。

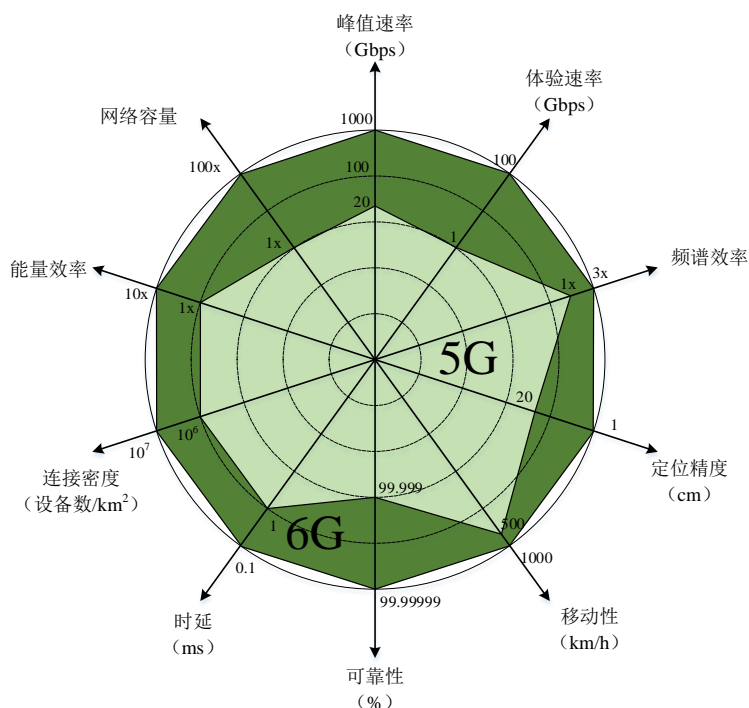


图11.6G 相对于 5G 的性能提升

峰值速率和体验速率：由于全息通信、沉浸式 XR/沉浸式云 XR 等应用场景的引入和增强，6G 相对于 5G 在速率方面需要有较大的提升。真人大小的实时全息通信对速率的要求在 Tbps 量级。即使考虑数据压缩算法的同步演进，6G 对实时全息通信的体验速率也应在 100Gbps 以上。

时延与可靠性：工业控制、自动驾驶等场景的进一步强化，对时延与可靠性的要求将达到新的高度。时延方面的性能指标相对于目前的 ms 级，会进一步下降至亚 ms 级，并且增加了对同步和时延抖动的要求。可靠性方面，对于涉及到人身安全的场景，人们的期望是绝对可靠。因此，从技术上来说，99.99999%的可靠性基本上可以达到人们的心理预期。

移动性：在 6G 时代，机载终端（Airborne Terminal）的应用会得到进一步普及。因此，6G 对移动性的要求也进一步提升，期望达到 1000km/h。

连接密度：相对于 5G，6G 的智能终端，尤其是智能物联网终端的数目将会大大增加。性能指标方面，单位面积或单位体积的设备数目至少是 5G 场景下的 10 倍。

定位精度：5G 对定位的初始要求不高。而随着 5G 的演进，越来越多的场景提出了对高精度定位的需求。尤其是在室内环境下，商用场景需要满足 20cm 的定位精度要求。在 6G 的应用场景中，cm 级的定位精度才能满足室内室外各种高精度的应用需求。

网络容量：随着未来用户速率及连接密度的增加，6G 场景的区域网络容量相对于 5G 大

约需要提升 100 倍。

频谱效率与能量效率：在基础理论未实现突破的情况下，频谱效率的提升有限。6G 通过挖掘提升频谱效率的技术潜能，实现相对于 5G 约 3 倍的提升。而 5G 在推广过程中面临的一个较严重的问题在于能耗过高，6G 需要实现较大的能量效率提升来满足未来的能耗需求。

此外，6G 中 AI 的应用也需要进行性能方面的量化和评估。6G 不仅要满足 AI 对算力和存储的需求，还需要实现针对不同的 AI 应用模块的智能化分级和准确度评估。

2.3.2.6G 终端芯片技术需求

6G 将构建成为一个 ICDT 融合、天地融合、虚实融合等全新生态。在这个生态中，终端将呈现泛在化、智能化、融合化等趋势。终端在通信、计算、存储、显示交互、传感等功能上的要求更丰富，并与 AI、云、大数据等结合带来更多产业和社会价值，创建万物智联的时代。

作为科技发展基石的半导体产业一直助力通信产业的发展，而被喻为“发动机”的芯片和器件是信息时代的综合能力体现。新的 6G 系统对终端芯片和器件在带宽、频率、功耗、集成度、多模化、智能化等方面提出了更高要求。在摩尔定律的放缓和 6G 系统全新能力要求的双重压力下，半导体技术也在进行持续的演进和革新，从工艺、设计方法、新材料、新器件等方面为未来终端芯片和器件提供新的解决之道。

■ 工艺

摩尔定律自诞生之后，指导着芯片行业向既定的目标前进，芯片行业的发展也促使摩尔定律调整和革新。移动通信的巨大市场驱动着半导体工艺的发展，在功耗和性能等方面的需求对半导体工艺提出了越来越高的要求。5G 时代终端芯片厂商纷纷将转向 7nm/5nm 的先进制程来提升芯片性能和降低功耗。未来 6G 时代，体验速率期望达到 100Gbps、时延达到亚 ms 级。此外，8K/12K/16K 到 24K 超高分辨率视频播放、沉浸式 XR、数字孪生/全息等关键指标和极致应用对通信能力和计算能力等要求更高。

6G 时代的芯片制程工艺将向着 1nm 甚至更低的节点迈进^[6]。同时，未来集成电路发展也将主要沿着扩展摩尔、超越摩尔和超越互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS）三个技术路线向前推进。其中，扩展摩尔是在晶体管结构、集成工艺等方面做创新，通过进一步微缩特征尺寸以提升集成电路密度；超越摩尔是通过功能扩展及功能集成，实现应用层面的系统性能提高；超越 CMOS 是从物理工作机制与技术实现方式上突破传统硅基 CMOS 场效应晶体管技术限制。

■ SoC vs. SiP

从2020年到2030年,移动终端的关键指标如中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)计算能力、摄像头数目和分辨率、传感器的数目将呈数倍增长,并且集成的功能也越来越多,复杂度也越来越高^[6]。随着摩尔定律逐渐逼近物理极限,系统级芯片(System on Chip, SoC)方案借助半导体芯片制程工艺来实现终端系统功能集成,而系统级封装(System in Package, SiP)在实现终端系统功能集成的成本和周期、芯片效能最大化等方面有优势。从设计和制作工艺的角度,SoC会将更多应用处理器核和通信处理器集成在同一个芯片中,并随着扩展摩尔的道路继续发展;从封装和组装的角度,SiP将不同集成电路工艺制造的芯片和器件集成封装在一起,具有技术集成度更高的优势,能够解决异质集成问题,从超越摩尔发展方向进行系统集成方式创新。未来6G终端将会面临高集成度、高复杂度、小型化、低功耗以及芯片器件异构等需求,SoC和SiP两种方案结合可以在追求半导体工艺提升、器件材料创新的同时,创造更多应用价值。

■ 存储器

6G场景中更高清视频、XR、全息等应用会对存储器带宽、容量、功耗等多方面产生影响。当前,存储器朝着高密度多层结构、新兴存储器类型发展,在读写速度、容量、功耗上不断提升和优化。在高密度多层方向发展上,3D NAND闪存通过把内存颗粒堆叠在一起解决2D或者平面NAND闪存带来的问题,高带宽存储器可将很多个双倍速内存(Double Data Rate, DDR)芯片堆叠实现大容量/高位宽的DDR组合阵列,达到Tbps级别的带宽能力。另一方面,近年来不少新兴存储器相继问世,例如相变存储器(Phase Change Random Access Memory, PCRAM)、电阻式记忆存储器(Resistive Random Access Memory, ReRAM)、非易失性磁性随机存储器(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM)^[6]。新兴存储器采用缩放的纳米级易失性和非易失性存储器技术,其信息处理的规模远远超过CMOS所能达到的规模。新一代存储器具有快速、高耐用性的特点,有望取代动态随机存取存储器(Dynamic Random Access Memory, DRAM)、NAND闪存和静态随机存取存储器(Static Random Access Memory, SRAM)。

■ 射频类核心芯片与关键器件

6G时代终端信号带宽有望展宽至数千兆赫兹,载波频率覆盖到太赫兹甚至可见光频段,天线向多频段、传输射频一体化、小型化发展。

一方面,受限于传统CMOS工艺,为了实现高性能与高能效,需要面对如何实现诸如大规模多通道射频器件与天线一体化、超高速模数/数模转换芯片等问题。

另一方面,通过新材料和全新物理机制实现全新的芯片器件,从根本上解决传统器件在物理层面所受到的限制。例如,可以基于锗硅、碳化硅、氮化镓、氧化镓、金刚石等新材料的研究突破为终端射频核心芯片和器件材料研制提供新的方向和路径。

■ 新型传感器

传感器作为未来 6G 终端的基本组件，将从简单感知转变到智能感知。届时诸多新型传感器从多种感知层面赋能终端，丰富人体感知，实现感知智能化。智能传感器芯片能够将传感功能与终端通信、控制、决策等系统深度组合，提高感知的分辨率、灵活性和智能性，从而满足 6G 时代对人机交互、智慧医疗、智能驾驶、数字孪生等领域的需求。

感知能力的突破，已经从通信技术领域向关键器件及新材料领域方向扩展^{[7][8]}。在人体感官智能化上，采用纳米材料和聚合物复合材料的嗅觉传感器和味觉传感器能够实现电子鼻和电子舌的功能。在智慧医疗领域，应用离子材料和纳米材料的植入微型传感器可以实现进入人体皮下器官，具备金属纳米结构表面的分子传感器可以用来分析如蛋白质单分子等各类生物元素的指纹。在智能驾驶领域，采用新型光学器件的 3D 图像传感器能够将车辆周围环境 360 度 3D 扫描成像，满足多场景实时智能操控和沉浸式驾驶体验。

■ 显示技术

显示技术作为交互的最重要方式之一，存在更大分辨率显示、更小的尺寸、更高的像素密度（Pixels Per Inch, PPI）、更快的刷新率等诸多需求，从终端芯片来看，未来 6G 和半导体技术需要与显示技术结合，围绕关键技术参数如分辨率、帧率、对比度和动态范围图像（High-Dynamic Range, HDR）等定义芯片规格，驱动和支撑未来新型显示技术，在提供高画质和传输质量的同时，提升用户体验。

3. 网络架构的演进

相较于传统网络（2G/3G/4G），5G 网络依然由接入网、核心网和承载网组成，整体网络架构相对固化。与此同时，接入网、核心网和承载网的控制面依然是独立集中式部署。6G 时代需要面向不同用户和业务需求进行更加灵活的网络部署和接入控制。传统运营商主要以管道为主，在云计算和应用内容方面主要依赖于云计算或 OTT（Over the Top）内容提供商。现有网络只能基于端管云分离理念进行设计，而未来 6G 需要基于端管云融合思路来设计网络架构。此外，6G 网络还面临着如下挑战：网络如何进一步延伸到太空，实现空天地网络一体化；如何实现数据可信和建立新的安全保障体系；如何减少人工干预，将 AI 和机器学习等自动化技术引入网络运维、安全防卫和自愈、网络自生长和自演进等方面；如何实现数字世界与现实世界的和谐交互。

为了迎接上述挑战，6G 网络可以引入以下潜在使能技术：

(1) 以用户为中心的全空间网络架构：改变传统的以网络为中心，用户接入网络的方式，建立以用户需求为中心、用户专属定制的网络架构；将网络从地面延伸到太空，建立全空间的统一网络架构，实现空天地信息深度融合交互。

(2) 泛在算力网络：利用算力网络将分散的算力资源进行有效整合利用，实现端管云的和谐统一。

(3) 安全可信的网络架构：网络具备内生安全能力，实现对安全问题的自检、自防和自处。包括区块链在内的多种安全技术将作为 6G 潜在使能技术。例如，利用区块链/分布式账本的去中心化、智能合约和不可篡改特性，实现数据可信和安全，提升网络和相关应用的运行效率。

(4) 原生 AI 架构：将 AI 技术和相关需求融入到网络架构设计、网元和接口实现和运维中，使得 6G 网络能够更好支持 AI 应用和应用 AI 技术更好服务 6G 网络。

(5) 自生长和自演进：网络具备根据业务和用户的需求、网络状态，通过 AI 和机器学习等方式，实现自生长和自演进，例如自动增加新的网络容量和网元功能。

(6) 数字孪生：通过将现实世界与数字世界的镜像，以及数字世界与现实世界中各自的调整互相映射，实现对未来的预测，优化整体和各模块的运行。

从宏观到微观的视角，6G 将在不同层级开展网络架构的研究，包括空天地一体和星际网连的宏观层面、以用户为中心对现有网络升级的中观层面和以人类自身为研究对象的微观层面。

下面将重点介绍与终端紧密相关的方向，包括以用户为中心的全空间网络架构、泛在算力网络和安全可信的网络架构。

3.1. 以用户为中心的全空间网络架构

3.1.1. 以用户为中心

6G 网络更加注重用户体验质量，需要尽可能地保证用户的服务不受客观环境因素影响，如用户快速移动、障碍物遮挡、干扰环境等。与此同时，随着通信频段从目前已经商用部署的毫米波逐步扩展到更高的太赫兹、可见光频段，以上客观因素的影响变得更加严重。因此，满足用户体验一致性需要从网络架构到关键技术进行全盘考虑。其中，以用户为中心的网络架构设计是实现该目标的关键技术。

图 12 给出了一种以用户为中心的网络架构。在该架构中，引入本地接入服务以降低高密度接入点接入核心网的信令开销，多个接入点通过回传链路连接到本地服务中心和本地数据中心。两个中心的引入是为了实现控制面和用户面的逻辑解耦，其中本地服务中心主要负责资源管理、服务质量管理和移动性管理，本地数据中心负责接入网侧数据传输。网络侧相对于传统核心网可以有所简化，主要由网络服务中心和网络数据中心组成。其中，网络服务中心主要负责通信控制、策略控制和网络控制；网络数据中心主要是负责核心网数据传输。

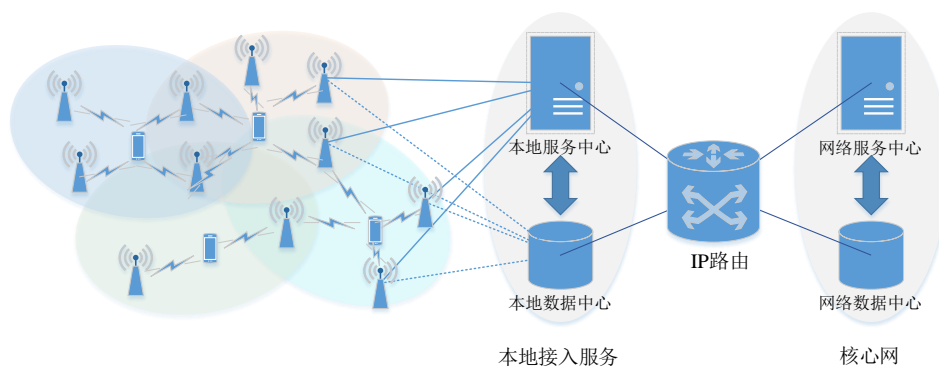


图12.以用户为中心的网络架构^[9]

本地服务中心可以通过测量用户的无线环境，制定最优的联合处理方案和服务质量控制。在本地服务中心的协调管理下，多个接入点通过相干联合发射和接收，在同一时频资源上共同为某个用户服务。对于每一个用户，每个时刻都有一组接入点来为其服务，这一组接入点称为以用户为中心的接入点子集。

以用户为中心的网络架构，与传统的蜂窝网络架构相比，可以大大提升覆盖性能，尤其是在部署了毫米波、太赫兹等高频场景下。根据用户不同位置下接入点子集内不同接入点的联合数据传输保证了用户一致性体验。

以用户为中心的网络，不仅仅是一种技术的变革，更是一种思想的变革。随着以用户为中心的思想逐步渗透，需要在如下方向展开深入研究：

- (1) 网络体系结构：从接入网到核心网都需要建立用户专属定制的网络架构。
- (2) 移动性管理：用户移动行为预测和接入点子集的动态选取是保证用户在移动场景下高性能的关键技术。
- (3) 干扰管理：以用户为中心网络中的干扰问题更加动态，需要重点研究用户间干扰和接入点子集间干扰的动态估计预测方法以及干扰协调机制。
- (4) 资源管理：基于用户类型、业务以及周边环境的感知，实现动态的资源调度。

3.1.2. 空天地一体化

未来的空天地一体化通信网络是以地面网络为依托、天基网络和空基网络为拓展的立体分层、融合协作的网络。各星座卫星（包括高、中、低轨）、临近空间平台（如热气球、无人机等）和地面节点共同形成多重覆盖，具有典型的异质异构特点。总体架构如图 13 所示。

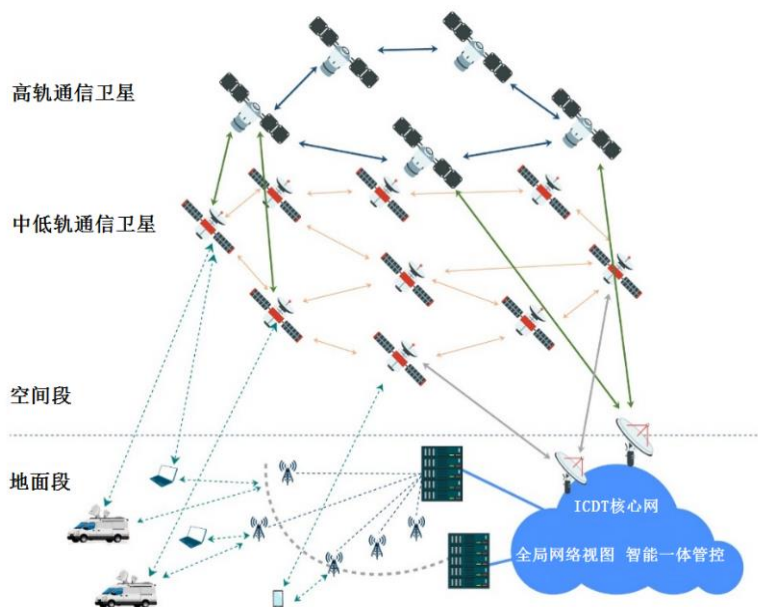


图13.空天地一体化网络总体架构

通过资源虚拟化技术，空天地一体化网络将实现接入网、承载网和核心网的一体虚拟化，并借鉴核心网微服务思想，将接入网控制面和用户面功能微服务化^[10]，并按需部署在地面或空间节点平台上，实现接入网和核心网融合一体化设计，降低空间节点的能耗。利用大数据和 AI 技术，根据不同应用场景需求，通过网络功能编排中心对各网络节点功能进行统一编排，形成网络即服务（Network as a Service, NaaS）的总体架构，从而实现空天地一体化网络按需智能重构。

在 NaaS 的架构下，空天地一体化通信网络可灵活地配置成如下模式：天基网络作为地

面网络的回传网络而存在，地面网络的基站通过天基网络接入到地面的核心网；天基节点具备部分基站的功能，如分布式单元部署在卫星节点上，集中单元部署在地面节点；天基节点不仅具备与地面基站等同的功能，同时还部署“边缘核心网”网元，承载部分地面核心网的功能。

空天地一体化网络架构还存在很多问题需要探索。首先，接入节点复杂多样，硬件环境和性能差异很大，这些特点对虚拟化平台的异构适应性提出了更高的要求。但是，现有的虚拟化平台对异构硬件环境的适应性不足，传统的网络功能编排器也缺乏对无线业务的描述和专用硬件设备的支持，还需要进一步优化改进。

3.2. 泛在算力网络

算力网络将算力与网络融合一体，为用户提供无处不在的计算能力，满足业务对计算、存储和网络的泛在需求。在算力网络中，计算资源类型众多，度量方式差异显著，并且传统信息系统中应用、终端、网络相互独立，缺少统一的架构体系进行集中管控、协同。因此希望未来可以屏蔽异构计算资源的底层差异，建立算力网络服务统一管控系统，通过网络层对应用层业务感知，建立端管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能力^[11]。



图14.算力网络

图 14 是算力网络的示意图，各节点，包括终端、边缘云（接入网、承载与核心网）和中心云，都具备一定的算力资源和能力。如何将它们统一管控、实现端管云融合一体，是 6G 算力网络架构重要的研究方向，具体来看，需要解决以下关键问题：

- (1) 不同终端业务场景对算力资源的需求研究：从终端角度分析不同的业务场景中，哪些算力应用在终端本地无法完成或者更适合在网络/云端完成。终端典型的算力应用业务场景包括：图像处理、智能语音识别、个人助理、自动驾驶、隐私保护、基于大数据分析和 AI 技术的其他应用场景等。
- (2) 端管云一体的算力网络运营管控技术：首先，以终端应用需求为驱动，设计一体化的算力网络架构，包括网元设计（对现有网元的功能增强或新增网元），终端与网络/云端接口（网络层/应用层）设计；进一步的，根据网络各节点的计算能力和节点间的传输能力，研究算力资源调度分配策略。此外，可以根据空天地一体化背景下网络结构动态变化和业务分布不均匀等特点，设计实时高效的分布式算力协同机制。

- (3) 多方协作关系和运营模式：设计满足用户需求、运营商和应用等三方可控可管需求的算力网络运营方案，实现多方共赢。
- (4) 算力应用感知和算力度量：为实现网络智能、协同调度算力资源能力，需要深入研究算力度量、算力服务匹配以及网络层对应用层感知等问题。

3.3. 安全可信的网络架构

随着网络架构的改变和新业务、新型终端的引入，6G 网络面临着新的安全威胁。依靠信息化系统和安全系统的聚合、业务数据和安全数据的聚合、IT 人才和安全人才的聚合，从网络内不断培养起自适应、自主和自成长的安全能力，网络安全逐步进化到“内生安全”时代。为实现智慧内生安全，需要研究以下潜在的 6G 安全技术：

- (1) 区块链技术：利用区块链技术实现消息与数据加密、身份识别、智能合约和数据保护等安全保护机制，进而在 6G 网络中支持安全要求更高的业务场景，如原生数字货币。
- (2) 零信任安全体系：打破传统的安全体系边界，在所有终端和网元实体之间建立泛在化的零信任安全体系。
- (3) 柔性重构的差异防护：为不同的防护场景提供差异化的安全资源和安全能力。安全能力按需柔性编排、重构和组合，既满足安全需求又减少不必要的资源浪费。
- (4) 物理层安全技术：利用无线信道的特征差异，提取无线信道的“指纹”，提供实时生成、无需分发的快速密钥，形成无线通信“物理隔离”效果的私密传输通道，设计以信号传输路径和信道特征为核心的认证机制。

4. 6G 核心技术

为了适应场景和需求的多样性，6G 核心技术也将会呈现多元化。一方面可以是来自现有通信技术的进一步演进，如超大规模多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）技术、非正交接入技术、新的调制编码技术等。另一方面，6G 也会去探索全新的技术领域，例如拓展频谱的太赫兹以及可见光通信技术和提升频谱效率的全双工技术。此外，6G 还会研究星地协同传输技术，实现从天空到陆地的无死角覆盖。同时，AI 技术在 6G 中也会起重要作用，它可以同其它绝大部分 6G 核心技术相结合，进一步优化 6G。

4.1. 太赫兹通信技术

太赫兹频段位于 0.1~10 THz，该频段介于技术相对成熟的微波频段和红外频段两个区域之间，有着极其丰富的无线频谱资源^[12]。但受技术和器件限制，太赫兹频段一直未被真正地发掘。6G 时代有望依托太赫兹频段的丰富资源，在几十甚至上百 GHz 的超大通信带宽上实现 Tbps 级别的高速通信。除高传输速率之外，太赫兹通信还具有抗干扰能力强、可穿透等离子体鞘套、波长短等特点^[12]。基于以上特点，太赫兹通信可应用于：

- (1) 光纤替代场景：在数据交换中心和基站高速回传等场景中，可以利用太赫兹无线通信来解决光纤铺设复杂及难度大的问题。
- (2) 空间通信场景：利用太赫兹波在太空传输损耗小且可穿透等离子体鞘套的特点，太赫兹通信可在星间或飞行器间的通信场景中发挥优势。
- (3) 微观通信场景：由于太赫兹波极短，可支持孪生体域网、芯片间通信等终端尺寸极小的场景，进而实现无线通信从宏观到微观的全面覆盖。

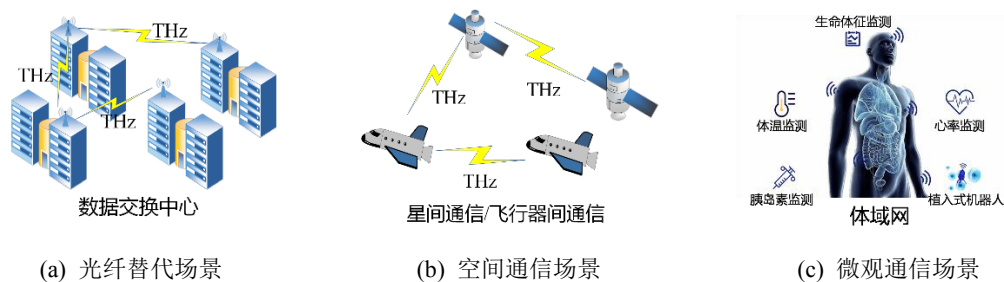


图15. 太赫兹应用场景

虽然太赫兹通信可以在速率提升和场景扩展等方面为 6G 提供极大的助力，但目前要实现太赫兹通信也存在着不少挑战与阻力：

- (1) 分子吸收：太赫兹电磁波易被大气中的水、氧气等分子吸收，导致其传输距离十分有限^{[13][14]}。其中，水分子吸收特性如图 16 所示，其吸收呈现频率选择性。

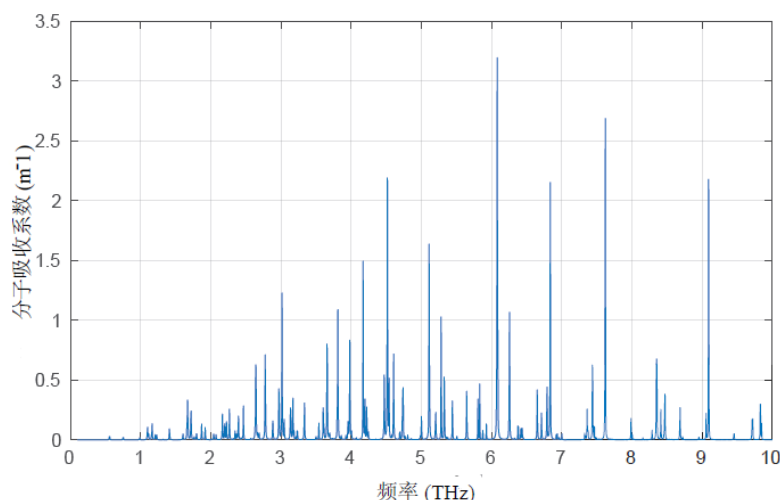


图16.水分子吸收特性

- (2) 太赫兹源：高功率、低成本、体积小、稳定性高的信号源是太赫兹技术能否在 6G 时代得到广泛应用的关键因素。现有太赫兹源的主要类别和对应输出的信号功率范围^[15-17]如图 17 所示。

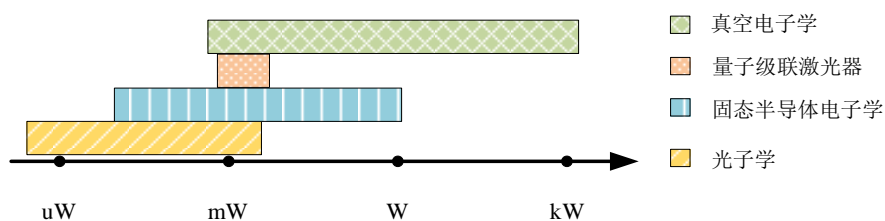


图17.各类太赫兹源的输出功率

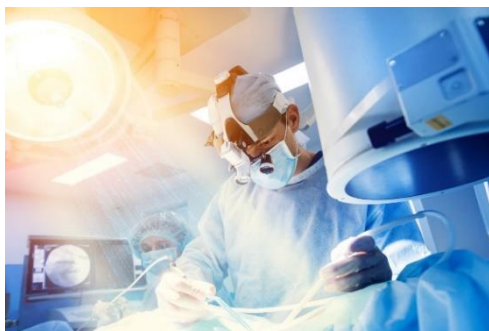
其中，真空电子学太赫兹源能产生较高的输出功率并可在室温环境下工作。但是，其在功率容量和能量转化效率等方面存在性能缺陷，尚需进一步改进。其他太赫兹源，或存在体积较大、价格昂贵等缺点，或需要极低温度的工作环境，导致它们难以在无线通信中被广泛应用。

- (3) 基带处理：要实现 Tbps 级别的太赫兹通信，模拟数字转换器和数字基带要有极强的数据处理能力和数据存储能力。实现高带宽、低功耗及面积小的基带处理技术和基带工艺具有很大挑战。
- (4) 太赫兹天线：太赫兹天线需要支持几十或上百 GHz 的超大带宽，同时还必须具备微型化、可集成度高等特性，而这些是当前太赫兹天线无法同时满足的。
- (5) 波形设计：太赫兹波形需具有较低峰均比和较强噪声鲁棒性，以克服太赫兹通信面临的器件性能有限、相位噪声大以及路损严重等问题。另外，太赫兹波形还需要有较强的兼容性，以适应多种应用场景。

- (6) 组网技术：太赫兹通信距离有限，需要设计中继多跳网络来扩展覆盖范围。此外，太赫兹波束窄且数量多，在组网和接入过程中需要设计高效的波束扫描和跟踪算法。

4.2. 可见光通信技术

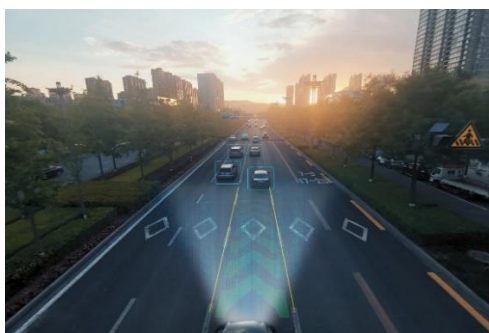
可见光通信是一种利用频率范围为 400~800 THz 的可见光进行数据传输的无线技术^[18]。相比于传统无线通信频段，可见光具有频谱资源丰富、无需授权的特点。同时，可见光通信可以兼具照明、定位等功能，能够重用现有基础照明设施，降低网络部署成本。此外，可见光因其不产生电磁辐射、不受无线电干扰的特点，特别适用于电磁敏感区域和高保密场景下的通信。图 18 给出了可见光通信的典型应用场景。



(a) 医疗设备间通信场景



(b) 核电站设备间通信场景



(c) 行驶车辆间通信场景



(d) 停车场车辆定位场景

图18.可见光通信的典型应用场景

可见光通信系统的基本结构可以分为三个部分：可见光发射端、可见光传输信道和可见光接收端。可见光通信的基本流程图如图 19 所示。

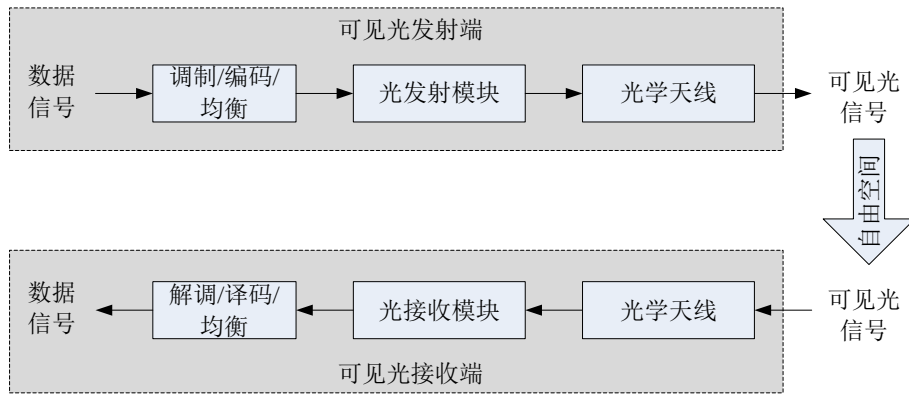


图19.可见光通信的基本流程

与传统无线通信系统相比，光发射接收模块中的光电信号转换器件的发展是影响可见光通信应用的关键因素之一。常见的光发射器件主要包括发光二极管（Light Emitting Diode, LED）、激光二极管（Laser Diode, LD）和超辐射激光二极管（Super Laser Diode, SLD）三类，主要特点见表 1。

表1. 常见的光发射器件特性

器件类型	发光方式	调制带宽	其他特点
LED	自发辐射	小于 100MHz	开启速度快，效率高，发热少，寿命长
LD	受激辐射	大于 1GHz	无效率跌落效应，易产生散斑效应，对人眼有潜在危害
SLD	放大的自发辐射	400~800MHz	亮度高，无散斑效应，对人眼无害

常见的光接收器件主要包括正-本征-负（Positive-Intrinsic-Negative, PIN）光电二极管和雪崩（APD, Avalanche Photodiode）光电二极管两大类。相比 PIN 光电二极管，APD 光电二极管通过在 P 型半导体和 N 型半导体之间增加了雪崩倍增层，大大提高了接收灵敏度。

除光电信号转换器件外，可见光通信的发展还面临以下挑战：

- (1) 快速的基带处理能力：为实现大带宽、高速率、低时延的可见光通信，基带处理能力需要相应增强。此外，与现有无线通信技术相比，可见光通信链路更易受器件和传播环境的影响，进而导致接收信号具有复杂的非线性畸变，需要研究快速基带算法，实现信号畸变的抑制和补偿。
- (2) 可见光频闪效应的抑制：在可见光通信与照明功能相结合时，常见的编码调制方式会引起光功率不平衡，从而造成肉眼可以感知的频闪现象，危害视力健康。因此，需要设计特殊的调制编码方案，解决可见光通信中的频闪效应。
- (3) 可见光通信组网技术：可见光随着传播距离快速衰减，其限制了可见光通信系统的覆盖范围，需要设计灵活的同构、异构组网方案，高效综合利用可见光频谱和传统

无线电频谱，来保证网络的有效覆盖和热点速率提升。

4.3. 全双工技术

全双工技术能够在同一时间、同一频率上进行数据发送和接收。与传统的时分双工与频分双工技术相比，全双工技术可以更加高效的使用频谱资源，在理想情况下可以获得两倍数据率提升。与此同时，全双工技术带来更多上行资源，可以扩大小区接入用户数量。

全双工技术商用的最基本挑战是消除同一设备内的发射信号对接收信号产生的干扰，也即业内所提到的自干扰抑制。目前，在 2.4GHz 频段上使用了 20MHz 的带宽，对于独立收发天线和共享收发天线两种情况，分别可以实现 95dB 的自干扰抑制^[19]和 110dB 的自干扰抑制^[20]。随着带宽的增大，自干扰抑制的实现难度会逐渐增大，因此对于 6G 系统的太赫兹、可见光频段，应用全双工技术还有不小的挑战。

出于实现全双工技术的高复杂度、高功耗和高成本的考虑，全双工技术可优先在基站或中继端实现。如图 20 (a)所示，在同一个频段上，基站可以同时服务用户 1 的上行传输以及服务用户 2 的下行传输。

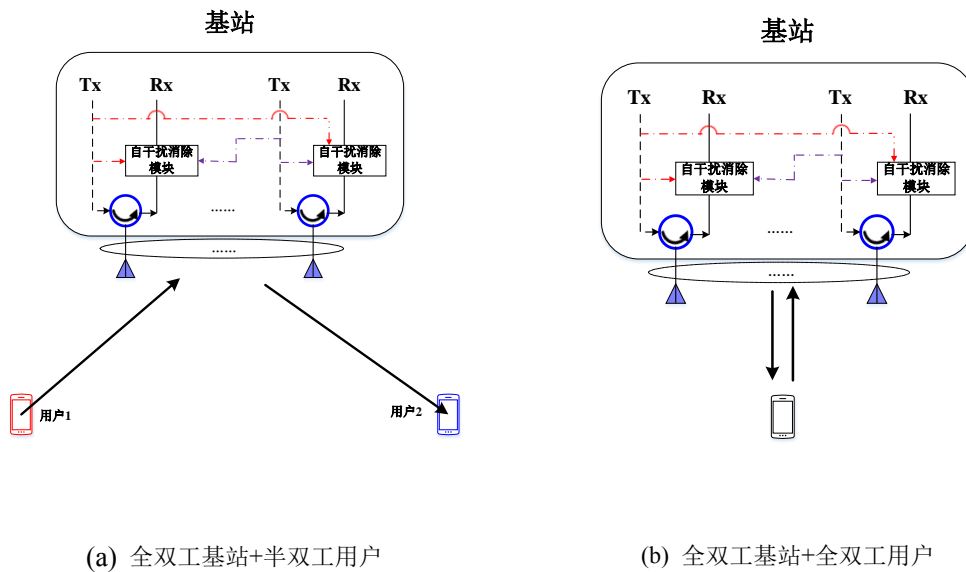


图20.全双工基站与半/全双工用户通信

进一步，随着终端能力的增强，终端可引入全双工技术。如图 20 (b)所示，基站在同一时频资源上的上下行传输数据可来自同一终端，这给予网络更大的调度灵活性。

可以预见，在未来 6G 网络中会出现全双工基站和传统半双工基站混合组网、全双工/半双工不同终端类型共存的情况。全双工信息传输模式也会进一步从基站和终端间通信扩展到终端直连全双工通信。随着全双工基站/终端在网络中比例的增加，网络中的干扰也会显著

增加，相应网络内的干扰抑制和干扰管理也是要面对的挑战之一。

4.4. 增强 MIMO 技术

■ 超大规模天线

为满足更高频段应用、高谱效和深覆盖等需求，6G 系统需要部署超大规模天线。超大规模天线的部署方式可以分成集中式和分布式，如图 21 所示。对于集中式部署，随着天线规模增加，信道将会从随机性逐渐转变为确定性，在接收端利用简单的匹配滤波技术，便可以消除干扰，简化接收端的复杂度。对于分布式部署，不同的射频拉远单元（Remote Radio Unit, RRU）可以拉近终端和基站之间的距离，从而基站可以以更低的功率来服务用户。分布式的部署方式，可以更好的服务小区边缘用户，实现 6G 无边界覆盖。6G 系统可以利用集中式部署和分布式部署各自的优势，来提升超大规模天线性能。此外，随着高频段应用，波束会变得更加精细且数量会急剧增加，需要研究高效的智能波束选择方法。

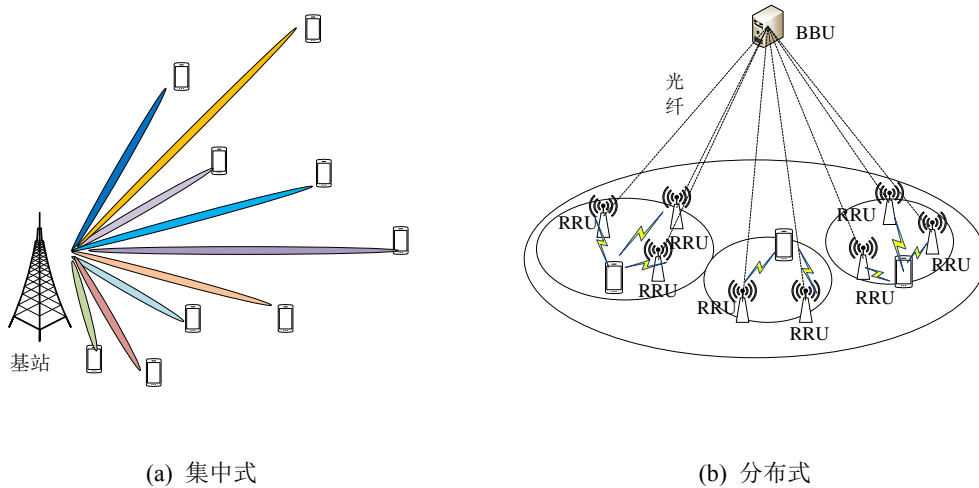


图21.超大规模天线部署方式

■ 轨道角动量

多天线多流技术传输需要丰富的信道散射环境，在高频段通信中，发射机到接收机的无线信道呈现直视径 (Line-of-Sight, LOS) 为主的特点，因此难以实现点对点的高阶多流传输。轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 技术通过多路不同模态共轴传输的方式携带数据，可以提升 LOS 径下的信道容量和频谱效率。

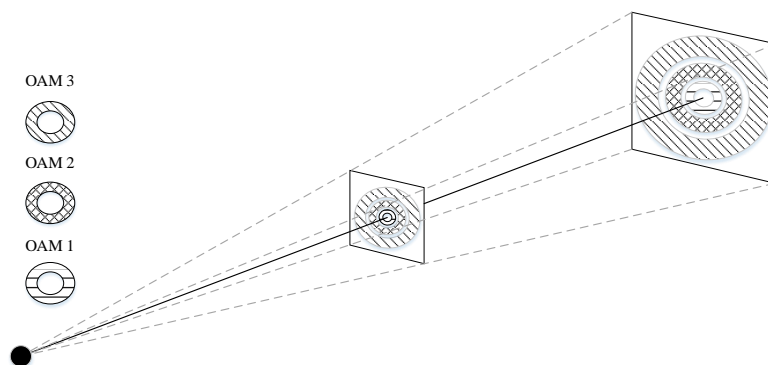


图22.OAM 复用技术

如图 22 所示，随着传输距离的增加 OAM 波束呈现发散性，且模态越高 OAM 波束发散性越显著。为了保证接收信号的功率，终端需要面积较大的接收机面板，而这会增加终端的功耗和成本。因此，未来将 OAM 技术扩展到更长距离的传输还存在着较大的挑战。

不同模态的 OAM 波束之间相互正交的前提是各个模态需要共轴传输，即接收天线阵面和发送天线阵面需要平行且中心对准^[21]。在移动场景下，如何保证共轴传输，以及在非共轴情况下解决模态间的干扰问题是一个重要研究课题。

■ 智能反射面

智能反射面（Intelligent Reflecting Surface, IRS）由大量的电磁单元构成。IRS 可以通过改变智能超表面阵子的特性实现对入射电磁波幅相特性的改变。如图 23 所示，智能超表面技术可以重塑无线传输环境，为盲区的用户提供可靠的通信链路^[22]。

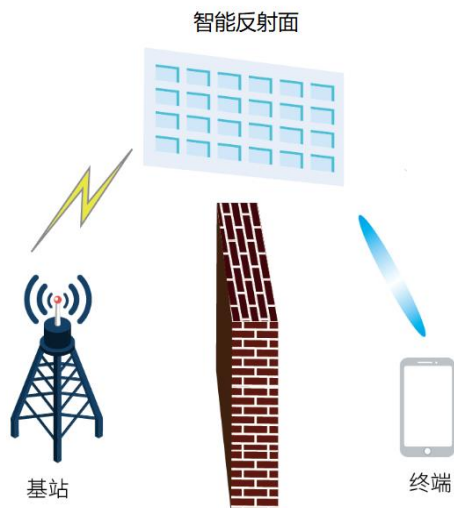


图23.盲区用户基于 IRS 通信

目前 IRS 的研究尚处于初步探索的阶段，存在着诸多挑战如超表面材料成熟度、信道建模、信道估计以及信道反馈等等^[23]。其中，超表面材料一方面需要成熟的工艺和较低的成本，

另一方面还需要进一步增强超对表面材料阵子的控制。此外，IRS 辅助的通信系统信道特征尚不清楚，还需进一步研究。同时，发射端与 IRS 之间的信道和 IRS 与接收端之间的信道可能呈现不同的特征，因此信道估计方法和信道信息反馈机制都会有所差别。

4.5. 先进调制编码技术

■ 调制

索引调制能够通过使用一个或多个不同资源类型的索引作为信息携带载体^[24]。相比于传统的幅相调制，它可以获得更高的频谱效率。其中，索引调制的信息携带载体种类颇多，目前已提出的主要新型索引调制技术如表2所列：

表2. 索引调制主要类型和特性总结

调制类型	信息传递载体	优势
空间调制 ^[25]	天线激活状态	层间干扰小，译码复杂度低，吞吐量高，收发端射频单元少，成本低
多载波索引调制 ^[26]	载波激活状态	吞吐量高，载波间干扰小，频率选择性增益
空时稀疏多径调制 ^[27]	时域多径激活状态	射频和导频资源开销小，译码复杂度低
多域资源联合调制 ^[28]	时域、频域、空域	灵活性高，适用广泛

索引调制在获得额外频谱效率和译码性能增益的同时也会对实际系统设计带来挑战。以空间索引调制为例，接收端可采用最大似然检测译码算法达到最优性能。然而当发射天线数或者同时激活射频数较多时，最大似然检测复杂度呈指数级上升，实际系统难以实现。如何设计低复杂度检测算法同时保证终端译码性能，是一个值得研究的课题。

■ 编码

5G 系统的编码技术对数据信道和控制信道采用了差异化处理，其中数据信道采用低密度奇偶校验码（Low Density Parity Check Code, LDPC），控制信道采用 Polar 码。为满足 6G 更高通信需求，现有的编码调制方案需进一步增强。目前潜在技术方向包括 LDPC/Polar/Turbo 编码方案增强、高鲁棒低复杂度的译码算法、“外码+内码”的联合编码方案。

增强的编码技术，主要有多元 LDPC 码^[29]和空间耦合 LDPC 码^[30]等。其中，多元 LDPC 码抗突发错误能力强于 5G 系统中的二元 LDPC 码^[31]，因为前者可以将多个突发错误合并成较少的多元符号错误。空间耦合 LDPC 码可通过窗译码器实现线性复杂度的递归译码，其中窗译码器有较低的译码时延以及较大的译码灵活性。

增强的译码技术，主要包括增强的多栅格置信传播译码算法以及同神经网络结合的译码算法。相关算法如何设计以获得性能可靠性和复杂度之间的良好折中，以及同神经网络结合

的编译码算法^[32]如何落地并进行广泛应用，是值得进一步研究的课题。

4.6. 非正交接入技术

前五代移动通信中采用的是正交多址方案，具体包括频分多址、时分多址、码分多址和正交频分多址。6G 时代的连接数规模较 5G 时代将有数十倍增加，非正交多址技术方案在满足大连接数，低时延和高负载等要求方面的潜在优势，使其成为 6G 时代有竞争力的接入候选技术。

从技术上来区分，非正交多址接入技术可以分成三大类：基于功率域的多址方案、基于扩频（码域）的多址方案以及基于交织的多址方案。

- (1) 基于功率域的多址方案的代表性技术是 MUST (Multi-User Superposition Coding)。MUST 的研究起始于 3GPP LTE Release 13^[33]，并在 Release 14^[34]完成了标准制定。其基本原理如图 24 所示，小区近端用户和远端用户的信号按照特定的功率比在功率域叠加传输。其中，近端用户在解码的过程中需要先解出远端用户的信息，然后获得自己所需要的信息；而远端用户可以直接将近端用户的信息当作干扰来处理。

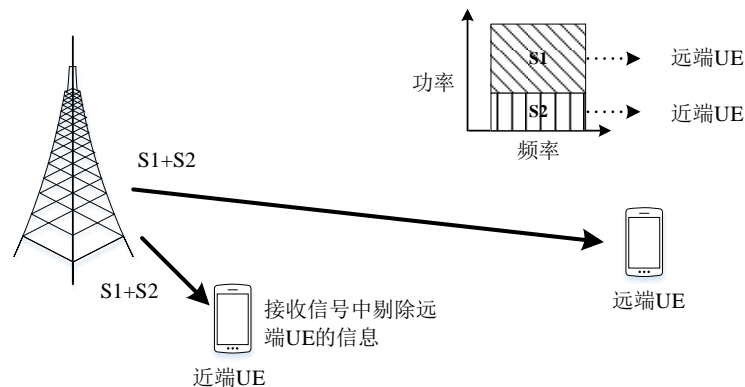


图24.MUST 原理示意图

- (2) 基于扩频的多址方案主要有 MUSA (Multi-User Share Access)、LDS (Low Density Spreading)、PDMA (Pattern Division Multiple Access)、SCMA (Sparse Code Multiple Access) 和 RSMA (Resource Share Multiple Access)。以 MUSA 为例，MUSA 的主要技术特征是不同用户采用不同复数扩频序列来扩展用户的调制信息^[35]，如图 25 所示。复数扩频序列元素的实部和虚部可以来自一个多元实数集合，且序列之间不必正交。然后，借助于串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 和解扩频操作，基站可以依次获得各个用户的信息。

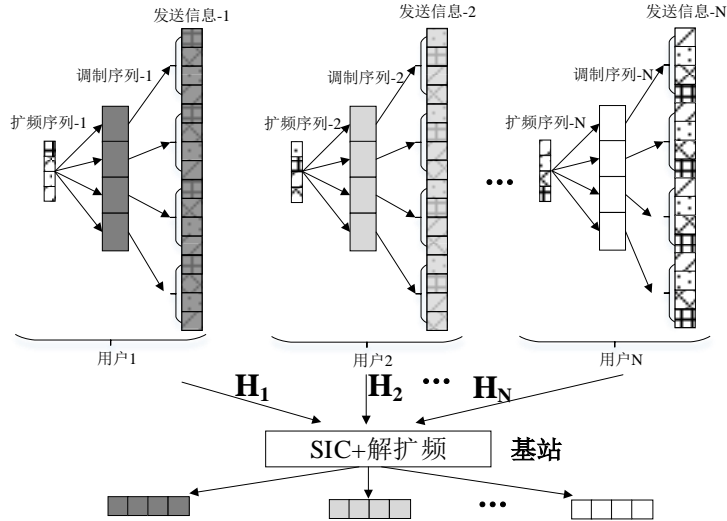
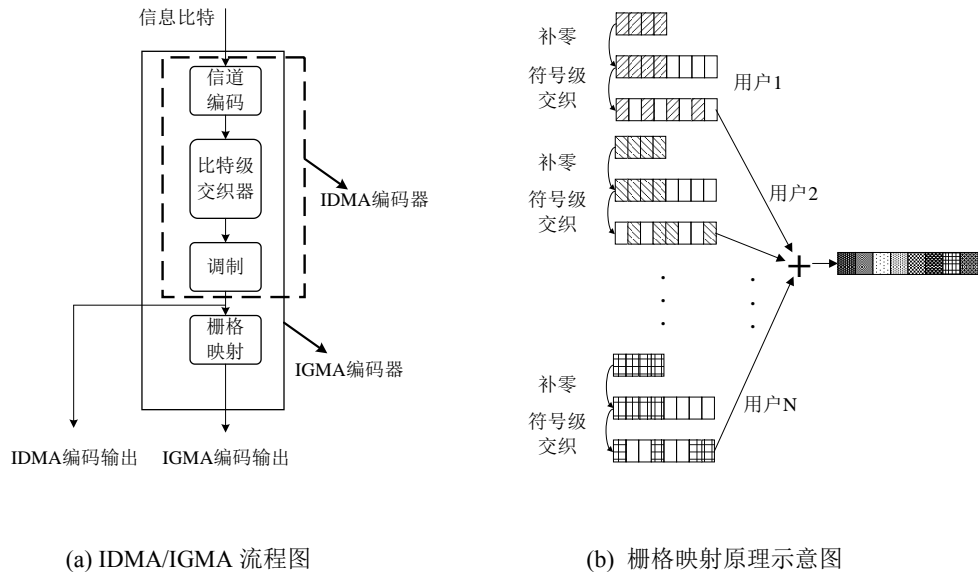


图25.MUSA 原理示意图

- (3) 基于交织的典型方案主要有两种：IDMA(Interleave Division Multiple Access)^[36]和 IGMA (Interleave-Grid Multiple Access)^[37]。IDMA 和 IGMA 主要依赖于低码率的信道编码和比特级交织器的组合，如图 26 (a)所示。不同用户具有不同的比特级交织器，在数据接收的时候，利用解交织和信道编码的纠错能力来消除各个用户间的干扰。唯一的不同在于，IGMA 还支持符号级交织，也称为栅格映射，具体原理见图 26 (b)所示。



(a) IDMA/IGMA 流程图

(b) 栅格映射原理示意图

图26.IDMA/IGMA 原理图

以上不同类型的非正交接入技术的共同特点是非正交的用户信息传输带来了用户间干扰，而且非正交程度越高消除用户间干扰的复杂度越大。考虑到不同场景下各用户干扰消除能力存在差异，设计相应的最优功率分配方案、扩频方案和数据交织方案是非正交多址的关键挑战。同时，能否获取精确的信道状态信息对非正交技术的性能也有较大影响。另外，高

性能、低复杂度的用户间干扰消除算法也是非正交多址技术能否应用于 6G 网络的关键。

4.7. 星地协同传输技术

在空天地一体化网络中，星地协同传输可充分发挥空间通信系统广域覆盖和地面通信系统宽带传输的优势，对系统中时间、空间、频率和功率等多维资源进行统一调度，以实现资源的最优化配置。如图 27 所示。

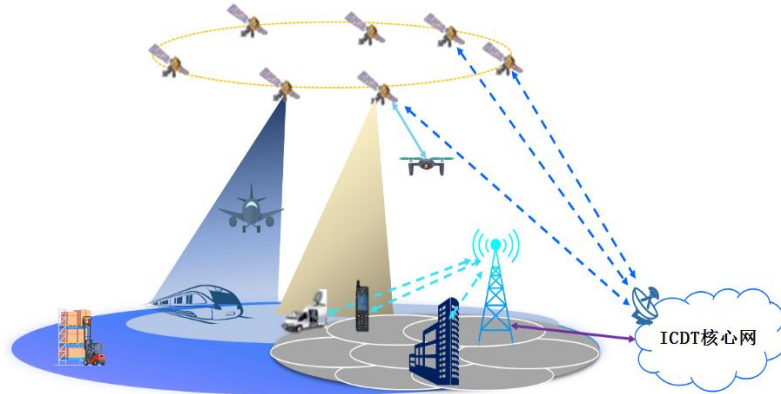


图27.星地协同传输

针对不同的业务场景，星地协同传输有不同的应用模式^[38]。广播信息或小数据包通过卫星进行传输，而高速数据业务包则由地面移动网络进行服务。卫星和用户的移动都会带来信道特性的变化，可根据信道的变化对不同卫星或不同层网络业务进行适配，从而提升系统容量。通过星地协同实现海量热点内容的广域分发，可以有效缓解地面骨干网的传输压力，提高网络整体传输能效，实现资源高效绿色集约使用。

目前，将卫星通信与地面通信有机结合，构建地星协同传输系统，实现未来无线通信全区域、全方位覆盖，是学术界和产业界热点探讨的话题。其中，针对星地协同传输相关的频谱共享、干扰协调、传输性能等问题已进行了初步探讨。但是，星地协同传输技术还存在许多问题需要深入研究，包括如何实现星地同步、降低接入开销和提高协同性能等。在空天地一体化通信系统中，星地协同带来的性能增益与产生的系统开销之间的折衷是决定协同传输能否成功应用的首要因素。卫星节点和地面节点与终端之间存在显著的大尺度路径差，使星地之间同步困难。另外，卫星通信信道的衰落特性有别于地面通信信道。例如，在莱斯卫星移动信道中，存在大量的直射分量，直接使用地面传统的协同传输技术不能获得优异性能。只有解决上述问题，星地协同传输才能在空天地一体化网络中实际应用。

4.8. AI 辅助通信

AI 具有强大的特征提取和快速寻找优化解的能力，可应用于多项 6G 核心技术的优化

设计中。例如，在太赫兹频段的超大规模 MIMO 技术中，利用 AI 算法可实现大量窄波束的高效动态管理；在可见光通信中，针对收发链路对光信号造成的非线性畸变，利用 AI 算法可实现有效的抑制和补偿，且 AI 算法也可以用于优化信道估计、光信号解调和均衡等；在全双工技术中，相比半双工网络，全双工网络的干扰会成倍增加，利用 AI 算法可优化极具挑战的干扰管理技术；在非正交接入技术中，用户调度和资源分配算法尤为重要，AI 算法也是解决该类问题的强有力工具。此外，AI 算法也可用于调制阶数自适应、信道译码以及星地协同传输技术中的卫星定位等。本节将从物理层优化和高层优化两个角度详细阐述。

■ AI 辅助通信物理层优化

AI 辅助通信物理层优化主要有两种方式：收发机联合优化和接收机优化。如图 28 所示，收发机联合优化是指发射机和接收机的对应模块可以利用 AI 技术实现端到端设计，主要包括基于 AI 的信道状态信息（Channel State Information, CSI）反馈以及多模块优化；接收机优化主要包括基于 AI 的信道估计、MIMO 信号检测和信道解码等。

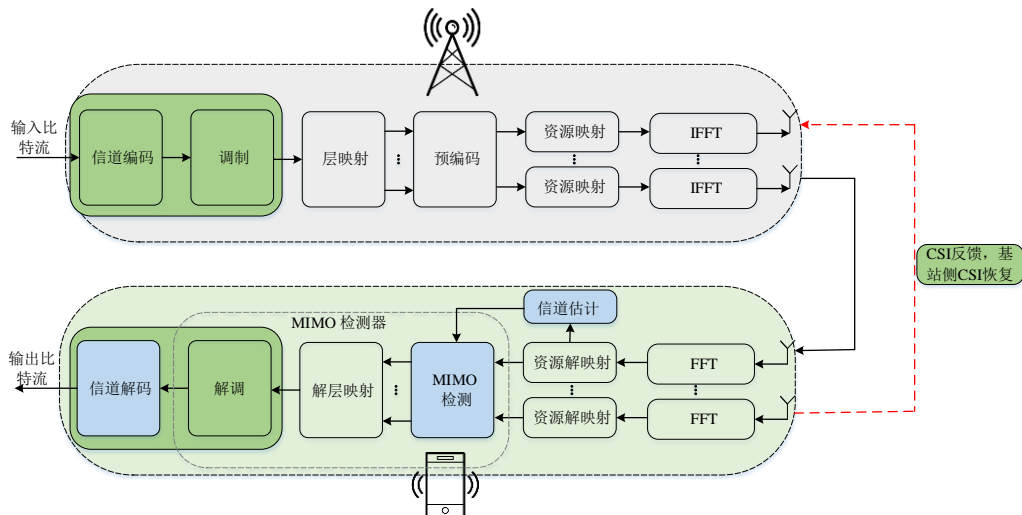


图28.AI 辅助通信物理层优化

● 收发机联合优化

(1) 单功能模块的联合优化：图 28 所示的收发链路中有多个模块可以利用 AI 算法进行联合设计优化，如信道编解码模块、CSI 反馈和恢复模块。以 CSI 反馈和恢复为例，在终端侧利用 AI 算法将 CSI 做压缩，在基站侧利用 AI 算法恢复压缩前的 CSI^[39]。应用 AI 算法可最大程度地在基站侧还原实际信道特征。目前，基于 AI 的 CSI 反馈和恢复算法的挑战是终端反馈开销较大。

(2) 多功能模块的联合优化：AI 算法还可以对收发链路上的多个对应功能模块进行联合优化，例如应用两个神经网络分别替代发射机的信道编码调制模块和接收机的信道解码解调模块，以避免传统多模块拼接带来的高复杂度和大计算量。多模块联合优化相当于对通信

物理层模块重构，对 AI 算法的泛化能力有更高要求。

- **接收机优化**

(1) 信道估计: 基于 AI 的信道估计可以通过对导频所处时频位置的信道进行训练学习, 估计出导频和数据的时频位置的完整信道, 从而大大提高信道估计准确度^[40]。基于 AI 的信道估计算法的高复杂度和各种信道条件的泛化能力是需要重点解决的问题。

(2) MIMO 信号检测: 基于 AI 的 MIMO 信号检测的一种简单实现方式是利用 AI 算法直接取代传统的信号检测算法, 但此种实现方式在高阶调制下算法复杂度较高。另一种实现方式是用 AI 优化传统信号检测算法, 如在传统算法中添加一些可训练的参数, 提高算法的灵活性以及信号检测性能^[41]。

(3) 信道解码: 与基于 AI 的 MIMO 信号检测类似, 基于 AI 的信道解码也可分为两种。一种是基于 AI 算法直接构造信道解码器, 利用 AI 算法对接收数据流进行监督训练以实现高精度解码。但是, 随信息比特增加, AI 算法复杂度将呈指数级增加^[42]。另一种是优化传统解码算法, 如训练基于 AI 算法的噪声估计器, 再结合传统译码算法, 提高解码准确度^[43]。

(4) 波束管理: 高速数据传输需要收发波束的精准对齐。AI 算法可以根据不同地理位置进行波束训练, 确定最优收发波束。此外, 波束训练阶段的用户位置信息的隐私保障也是后续研究的重点。

- **AI 辅助通信高层优化**

(1) 资源调度与分配: 实现最优的资源调度与分配需要遍历所有可能性, 由于其复杂度较高, 在实际部署中往往使用次优策略。使用 AI 算法可以建立信道质量指示和 QoS 等输入信息与调度策略的对应关系, 进而选择较优的调度策略。

(2) 定位: 非视距传输 (Non Line-of-Sight, NLOS) 场景和基站间同步误差会影响定位精度。AI 算法通过对采集的大量数据训练学习, 可提取传统定位算法无法获得的特征, 降低定位误差。此外, 未来 AI 定位技术的研究需聚焦于设计对环境改变不敏感的算法。

(3) 移动性: 网络覆盖与配置决策影响移动性场景中用户的服务体验。AI 技术可以预测终端所处场景和运动轨迹, 指导网络功能优化, 满足用户对无缝服务的移动性需求; AI 技术可以预测终端行为, 例如预测终端请求服务的类型和时间, 进而控制网络下发用户特定配置, 实现用户级别的移动性增强; AI 技术可以分析终端测量信息, 实现精准的小区选择、重选和切换, 增强用户体验。

(4) 网络运维: 传统人工经验难以处理日益复杂的网络运维问题, 网络智能化已成为未来 6G 网络的迫切需求。基于 AI 技术的网络故障自动化处理, 可以对网络常见问题进行根因分析, 输出解决方案并应用, 降低人力投入。

AI 技术能实现 6G 的通信智能化, 但需要满足一些规范和要求。在算法的仿真验证阶

段，仿真环境要符合实际条件，模型的泛化能力也需要进一步提高；在实际部署中，神经网络部署方式要更加灵活，可以结合不同节点进行联邦学习，神经网络参数可以实时更新优化。

基于上述需求，AI 辅助通信对终端芯片设计也带来极大挑战。首先，部分 AI 网络需要提前部署在终端，这对终端存储能力有较大要求。其次，模型的训练和推理需要终端有足够的算力，这将带来新的能耗挑战。最后，实现 AI 辅助通信，也需要引入新的数据接口、信令和流程设计。

5. 总结

随着 5G 的商用，5G 高速率、大连接、低时延、高可靠的特点极大丰富了移动通信的应用场景，在提升了用户体验的同时初步实现万物互联，起到改变社会的作用。6G，作为 5G 之后的下一代通信系统，随着 ICT 的融合，逐步由移动通信网络向移动信息网络发展，被人们寄予塑造未来的期盼。

本白皮书对未来 6G 可能的趋势、场景、需求以及候选核心技术进行了展望。与 5G 相比，6G 可以在性能、智能化、泛在化、使用感受和人文建设等很多方面实现大幅拓展和突破。届时，6G 将塑造一个无处不通信、无处不便捷、无处不 AI 的全新世界。

6. 参考文献

- [1] Goodfellow I, Bengio Y, Courville A, et al. Deep learning[M]. Cambridge: MIT press, 2016.
- [2] Yang Q, Liu Y, Chen T, et al. Federated machine learning: Concept and applications[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2019, 10(2): 1-19.
- [3] 可持续发展目标指南, https://www.un.org/sustainabledevelopment/wpcontent/uploads/2019/01/SDG_Guidelines_AUG_2019_Final.pdf
- [4] 2020 年可持续发展目标报告, https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Chinese.pdf
- [5] ITU-T Technical Report. Focus Group on Technologies for Network 2030. 2020.
- [6] Moore M. International Roadmap For Devices and Systems[J]. 2020.
- [7] Fethi A. Novel materials for electrochemical sensing platforms[J]. Sensors International, 2020: 100035.
- [8] Wu H, Cui Y, He C, et al. Activation of the bitter taste sensor TRPM5 prevents high salt-induced cardiovascular dysfunction[J]. Science China Life Sciences, 2020: 1-13.
- [9] Chen S, Qin F, Hu B, et al. User-centric Ultra-dense Networks for 5G[M]. Springer, Cham, 2018: 1-3.
- [10] 方敏, 段向阳, 胡留军. 6G 技术挑战、创新与展望[J]. 中兴通讯技术, 2020.
- [11] 算力网络架构与技术体系白皮书, 中国联通研究院, 2020.
- [12] CCSA. TC5-WG6 《可见光和太赫兹通信技术研究报告》.
- [13] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3211-3221.
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9-10): 533-572.
- [15] 王磊, 李飙. 太赫兹波及其产生方法的研究[J]. 中国科技信息, 2011(7): 41-43.
- [16] 杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬等. 太赫兹波及其常用源[D]. 激光与红外, 2011.
- [17] 孟凡亮, 余厉阳. 基于真空电子学方法的太赫兹源[J]. 物联网技术, 2015, 5(2): 50-51.

- [18] 迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京清华大学出版社, 2013.
- [19] Everett E, Sahai A, Sabharwal A. Passive self-interference suppression for full-duplex infrastructure nodes[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(2): 680-694.
- [20] Bharadia D, McMilin E, Katti S. Full duplex radios[C]//*Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM*. 2013: 375-386.
- [21] Xie G, Li L, Ren Y, et al. Performance Metrics and Design Parameters for a Free-space Communication Link Based on Multiplexing of Multiple Orbital-Angular-Momentum Beams[J].
- [22] Wu Q, Zhang R. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 58(1): 106-112.
- [23] 周儒雅, 金石. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述[J]. *移动通信*, 2020(6):63-69.
- [24] Cheng X, Zhang M, Wen M, et al. Index modulation for 5G: Striving to do more with less[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 126-132.
- [25] Di Renzo M, Haas H, Ghayeb A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 102(1): 56-103.
- [26] Wen M, Cheng X, Ma M, et al. On the achievable rate of OFDM with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 64(8): 1919-1932.
- [27] Mesleh R, Ikki S S, Aggoune H M. Quadrature spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 64(6): 2738-2742.
- [28] Datta T, Eshwaraiah H S, Chockalingam A. Generalized space-and-frequency index modulation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 65(7): 4911-4924.
- [29] Zhu M, Guo Q, Bai B, et al. Reliability-based joint detection-decoding algorithm for nonbinary LDPC-coded modulation systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 64(1): 2-14.
- [30] Kwak H Y, Yun D Y, No J S. Rate-Loss Mitigation of SC-LDPC Codes Without Performance Degradation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 68(1): 55-65.
- [31] 3rd Generation Partnership Project (3GPP): TS 38.212 NR; Multiplexing and channel coding, 2020.
- [32] Nachmani E, Marciano E, Lugosch L, et al. Deep learning methods for improved decoding of

- linear codes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(1): 119-131.
- [33] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), New study item proposal: Study on downlink multiuser superposition transmission for LTE, RP-150496. 2014.
- [34] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), New work item proposal: Downlink multiuser superposition transmission for LTE, RP-160680, 2016.
- [35] Dai L, Wang B, Yuan Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 74-81.
- [36] Ping L, Liu L, Wu K, et al. Interleave division multiple-access[J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2006, 5(4): 938-947.
- [37] Xiong Q, Qian C, Yu B, et al. Advanced NoMA scheme for 5G cellular network: Interleave-grid multiple access[C]//2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2017: 1-5.
- [38] 陈山枝, 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议, 电信科学, 2020.
- [39] Wen C K, Shih W T, Jin S. Deep learning for massive MIMO CSI feedback[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(5): 748-751.
- [40] Soltani M, Pourahmadi V, Mirzaei A, et al. Deep learning-based channel estimation[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 652-655.
- [41] He H, Wen C K, Jin S, et al. A model-driven deep learning network for MIMO detection[C]//2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2018: 584-588.
- [42] Gruber T, Cammerer S, Hoydis J, et al. On deep learning-based channel decoding[C]//2017 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). IEEE, 2017: 1-6.
- [43] Liang F, Shen C, Wu F. An iterative BP-CNN architecture for channel decoding[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(1): 144-159.