



第六代固定通信网 (F6G) 白皮书 V1.1 ——天地一体化光通信技术

信息光子学与光通信全国重点实验室

2023 年 11 月 4 日





目录

1. 固定通信网技术概述.....	4
1.1. 固定通信网演进历程.....	4
1.1.1. 固定通信网.....	4
1.1.2. F5G 与 F5.5G.....	5
1.1.3. F6G.....	6
1.2. 固定通信网面临的挑战.....	7
1.2.1. 覆盖能力.....	7
1.2.2. 生存能力.....	8
1.2.3. 连接能力.....	9
1.2.4. 智能能力.....	10
1.2.5. 安全能力.....	10
2. 天地一体化网络发展需求.....	12
2.1. 高速率全域接入.....	12
2.1.1. 广覆盖.....	12
2.1.2. 大带宽.....	13
2.2. 大容量安全传输.....	14
2.2.1. 大容量.....	15
2.2.2. 高安全.....	15
2.3. 高动态智能组网.....	16
2.3.1. 强智能.....	17
2.3.2. 高可靠.....	17
2.4. 多模态主动感知.....	17
2.4.1. 通感一体.....	18
2.4.2. 主动感知.....	19
2.5. 超时空全息呈现.....	19
2.5.1. 裸眼 3D.....	20
2.5.2. 通呈联动.....	21



3. 天地一体化光通信关键使能技术	22
3.1. 接入技术	22
3.1.1. 有线接入.....	22
3.1.2. 无线接入.....	23
3.2. 传输技术	24
3.2.1. 多维复用光传输.....	24
3.2.2. 空间激光传输.....	26
3.2.3. 物理层内生安全防护.....	27
3.3. 组网技术	28
3.3.1. 智能管控架构与协议.....	28
3.3.2. 光电混合交换技术.....	29
3.3.3. 生存性保障技术.....	30
3.3.4. 数字孪生技术.....	31
3.4. 感知技术	33
3.4.1. 通信感知一体化.....	33
3.4.2. 网络化智能感知.....	34
3.5. 呈现技术	35
3.5.1. 内容采集与处理.....	35
3.5.2. 三维渲染与呈现.....	36
4. F6G 适用场景与应用	38
4.1. 全时域光互联.....	38
4.2. 全息通信.....	39
4.3. 虚实交互.....	40
4.4. 智能体互联.....	41
附：主要贡献单位与人员（排名不分前后）	43

1. 固定通信网技术概述

固定通信网是指通信设备之间通过有线或无线方式实现固定连接的网络，可向用户提供语音、数据、多媒体等服务。通过百年发展，固定通信网不断向着宽带化、综合化、IP化、智能化和融合化的方向演进。固定通信网承担着海量信息传输的任务，是国家关键信息基础设施，也是支撑社会数字化转型的信息系统底座。

1.1. 固定通信网演进历程

在计算机与互联网技术的驱动下，固定通信网在近三十年得到了快速发展。1900 至 2000 年期间，固定网络主要承载语音业务，依托铜线基础设施，采用 PSTN/ISDN 技术，典型带宽为 64kbit/s。2000 至 2006 年期间，固定网络主要承载网页业务，典型技术为 xDSL，用于提供 20MHz 以下的宽带能力。2006 年至 2012 年期间，固定网络主要承载视频流业务。依靠 VDSL 技术以及光纤接入技术，FTTB 以及 PON+LAN 的接入技术，固定网络逐步提供 30~100MHz 的家庭宽带。2012 年至 2020 年期间，固定网络具有承载 4K 超高清视频流的能力，大规模发展并应用的 PON+LAN 可以提供百兆及以上的传输带宽服务。随着云计算、物联网等新技术发展，新型业务对固定网络的带宽、时延、可靠性提出了更高要求，来满足业务的高质量需求。业界开始以代际划分的形式为固定网络定义发展路径，提出了第五代固定通信网（F5G, the 5th Generation of Fixed Communications Networks）。

1.1.1. 固定通信网

（1）F1G—语音时代：固定通信网从电话网诞生一直持续到 20 世纪末，其主要服务于语音业务，但拨号接入和 ISDN 发展速度非常缓慢，仅能支持音频服务和拨号呼叫。在此阶段，形成了一个较完整的电话网络基础设施，并且其网络架构以及控制信号能够很好地适配全球网络，这标志着电信全球化的开始。该阶段接入网采用 PSTN/ISDN 技术，对应的传送网则采用 PDH 技术，其基群速率为 2Mbps，光纤线路速率以 140Mbps 为主。

（2）F2G—Web 时代：20 世纪末到 21 世纪初，随着互联网以及 ADSL 技术的推广，固定网络进入高速发展时期，宽带时代正式开始，主要用于服务 Web 业务。个人电脑和浏览器的普及推动了互联网的迅速发展，固定网络的应用由电话扩展到了电子邮件、搜索

引擎以及网页浏览等。接入网以 ADSL 技术为代表（10Mbps），对应的传送网采用的是 SDH 技术，光纤线路速率以 2.5Gbps 和 10Gbps 为主。

(3) F3G—视频时代：2005 年开始，在多媒体业务的驱动下，固定网络的业务和网络架构都出现了巨大的变化。由于传统 ADSL 技术和原有电话网的架构无法支撑“宽带”业务，因此引入 VDSL 技术（30Mbps~200Mbps）。对应的传送网采用的是 MSTP 技术，在 SDH 技术基础上增加了对以太数据业务的承载能力。

(4) F4G—4K 时代：2012 年开始，4K 高清信号的出现对宽带网络提出了更高的要求。为了满足这种高质量视频的传输需求，需要不低于 100Mbit/s 的宽带网络。以 GPON 技术为代表的光接入网上行总速率达到 1-2.5Gbps，具有高带宽、稳定、结构简化和能够长期发展的优势，因此得到运营商的关注。同时，对应的主流传输技术为 OTN 光传送网技术，这种技术结合了 WDM 技术和 SDH 技术优点，可以实现光纤线路速率全面提速，单波速率达到 100Gbps，一根光纤中同时传输 80 波信号，线路速率达到 80*100Gbps。

1.1.2. F5G 与 F5.5G

2020 年 2 月，ETSI 面向全球宣布成立 F5G 产业工作组，提出了从“光纤到户”迈向“光联万物”的产业愿景，标志着 F5G 时代正式开启。2020 年 2 月，全球主流的运营商、设备商、行业协会及研究机构均已加入该工作组。F5G 的主要特征有 3 个，分别是超大带宽 (eFBB, Enhanced Fixed BroadBand)、全光连接 (FFC, Full-Fiber Connection) 和极致体验 (GRE, Guaranteed Reliable Experience)。

2022 年 9 月，欧洲电信标准化协会第五代固定网络产业工作组发布了一份白皮书《F5G Advanced and Beyond》，介绍了 F5G 向 F5G Advanced（又称 F5.5G）演进的驱动因素、能力维度和关键使能技术。综合来看，F5.5G 对 F5G 进行了增强和扩展：

超高带宽 eFBB：通过更先进的固定网络技术，网络带宽容量可提高十倍以上，实现上下行对称宽带容量，实现千兆家庭、万兆建筑和百 G 级园区。利用 Wi-Fi 7、50G PON、800G 等下一代技术，将用户带宽体验从 1Gbps 提升到 10Gbps everywhere。

全光连接 FFC：通过光纤基础设施的全面覆盖，实现光纤延伸到每一个房间、每一个桌面、每一台机器，充分扩展垂直行业应用。业务场景扩展 10 倍以上，连接数增长 100

倍以上，实现每平方公里 10 万连接的覆盖。打造智慧家庭/企家协同/全光园区数字化底座。

终极体验 GRE：支持 0 丢包，微秒延迟，99.999%的可用性。配合 AI 智能运维，满足家庭和企业用户的极致业务体验需求。在可保障体验方面，自动驾驶从 L3 升级到 L4。家庭宽带从可视定位到体验自优化，专线/算网实现急速智能链接。

同时，F5.5G 向三个方面进行扩展：

RRL：在工业场景，实时韧性联接可满足工业场景微秒级时延、6 个 9 可用性要求；

OSV：光感知与可视化则聚焦于构建光纤通信感知融合和数字化运营能力；

GAO：OTN To EverySite，打造一跳直达，站点能效提升 10 倍。

固定通信网发展阶段

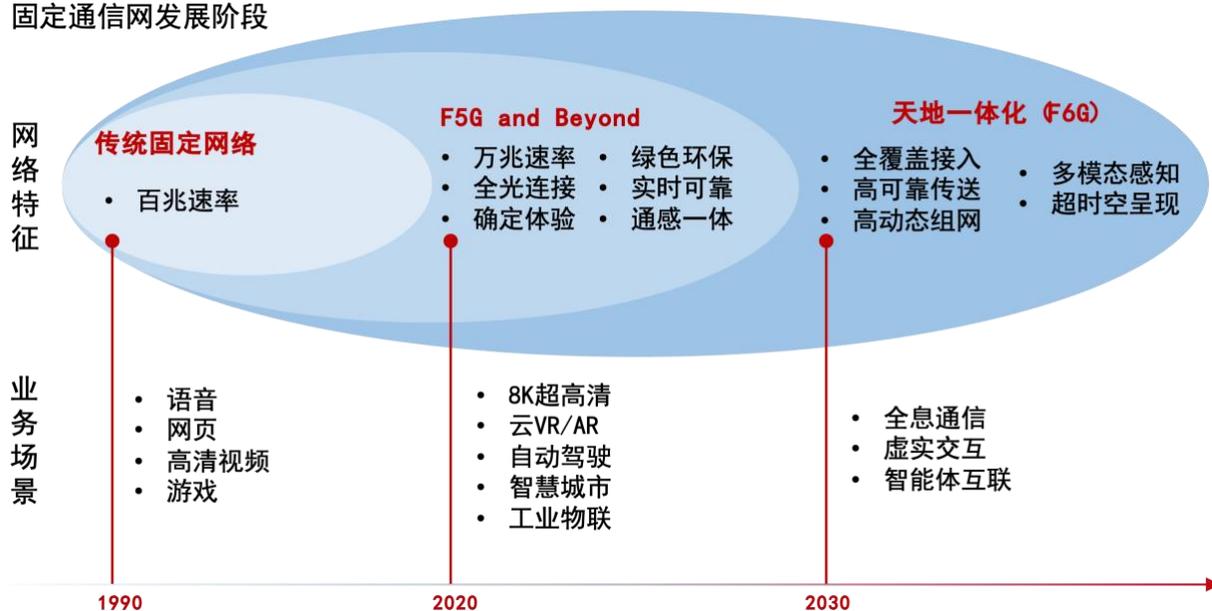


图 1 固定网络发展路线前瞻

1.1.3. F6G

虽然 F5G 和 F5.5G 已经可以满足地面业务的多种需求，但地基固定网络在连接覆盖面积、建设成本等方面面临诸多挑战。以卫星为基座的天基通信系统正在快速发展，未来将与地面固定通信网进行深度融合，共同面向消费级互联网业务提供宽带通信服务，形成天地一体化的第六代固定通信网（F6G），发展路线如图 1。

天地一体化网络是未来 F6G 网络架构研究的核心方向，由卫星组成的骨干网络使得地球上的用户可以随时随地享受高速宽带无线接入服务，可以克服距离障碍，实现包括地

面、高空平台在内的任意两点之间的高速通信，达到全球无缝覆盖。F6G 将实现卫星网络与地面光纤网络的互连互通，构成天地一体化光通信系统，满足不同行业对下一代网络的需求，并极大地提高用户体验，推动社会数字化转型和数字经济高质量增长。

1.2. 固定通信网面临的挑战

2021 中国互联网发展报告指出，互联网发展已进入万物互联阶段，新的应用正在向固定通信网提出更严峻的挑战。为了支撑未来的万物互联需求，F6G 将重点针对覆盖能力、生存能力、连接能力、智能能力和安全能力方面的挑战进行网络能力升级，如图 2。

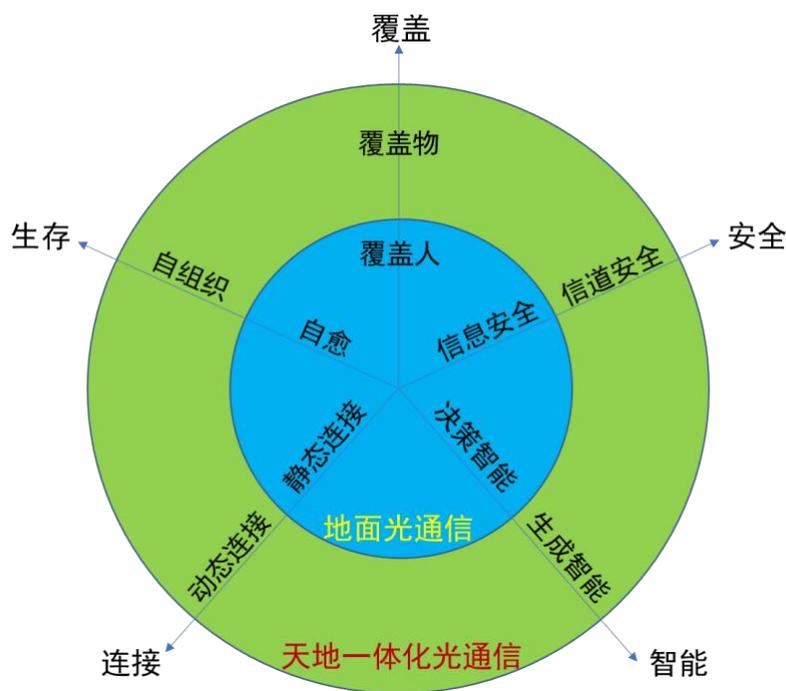


图 2 F6G 面临的技术挑战

1.2.1. 覆盖能力

传统地面固定通信网的优势在于其高数据传输速率、低时延以及海量连接能力。但其覆盖范围受限，在偏远及无人区域建设难度大、运营成本高。目前，地球上超过 70% 的地理空间，涉及 30 亿人口未能实现互联网覆盖。

为了支撑未来无人区域数字化管理、空间智能体互联等新兴业务的通信需求，未来地面固定通信网需与空间卫星网络进行融合，构建可覆盖全球的天地一体化骨干通信网络，

推动传统网络由“面向人”覆盖到“面向物”覆盖的转变，为全球用户的各类应用提供全域宽带连接支持。在覆盖能力方面，天地一体化光通信技术正面临如下挑战：

1) 覆盖速率：地基固定网络接入速率可达 10Gbps，未来将在 50G-PON 的基础上进一步发展至 100G，而当前卫星网络的接入速率仍比较受限。如何提升卫星网络在覆盖区域的接入速率，是覆盖能力方面的关键挑战之一；

2) 覆盖时延：亚毫秒级时延将成为空天地一体化网络的整体需求，充分考虑地面和天地融合网络，打造亚毫米波延迟覆盖、毫秒级延迟覆盖、十毫秒级延迟覆盖等多层次网络结构和服务场景，是覆盖能力方面的关键挑战之一；

3) 覆盖密度：由“面向人”覆盖到“面向物”覆盖的转变过程中，“万物智联、手机直连、天地互连”等应用将极大提升对网络的可达性、可靠性和覆盖密度的需求，相比于传统网络，下一代天地一体化网络的单位面积接入设备密度将提升 100 倍至 1000 倍，如何有效提升覆盖密度，是覆盖能力方面的关键挑战之一；

4) 覆盖灵活性：覆盖灵活性是指覆盖场景灵活、接入方式灵活、用户速率灵活以及终端类型灵活。如何构建具有环境感知、自主智能决策、按需重构和无缝融合的天地一体化网络体系架构，是覆盖能力方面的关键挑战之一。

1.2.2. 生存能力

网络生存性是指网络应对故障的能力，对保障网络的正常运行具有重要意义。据统计，目前光纤网络故障平均修复时间可达 5-10 小时，生存能力不足将会严重影响业务质量和用户体验。传统固定网络的生存性机制多聚焦于小规模故障，可保障通信业务在面对故障时具备一定的自愈能力，但面对区域性的故障通常束手无策。

天地一体化网络扩大了网络的覆盖尺度，同时也扩大了故障的风险范围。未来，天基的高动态卫星网络会面临空间碎片、激光武器等潜在威胁，可能出现规模性节点或链路故障。为应对大尺度的故障风险，天地一体化网络的生存性技术需要由“自愈”向“自组织”方向发展，通过对卫星节点、星间链路的动态调度与配置，支持天地网络的智能化自组网，进而提升网络面对大范围故障的抗毁和生存能力。在生存性能力方面，天地一体化光通信技术正面临如下挑战：

1) 业务动态管理：由于天地一体化网络拓扑存在动态性，特别是星地链路部分，因此对星间/星地激光链路状态与连接情况的实时感知是业务生存性保障的基本要求，如何实现广域业务的动态监控与管理是保障业务生存性的关键挑战之一；

2) 星地按需协同：由于目前网络传输体制和运维方式的约束，当前天、地两层网络基本采取分域治理的形式，跨域业务如何实现多域资源的协同联动以完成路径拼接与端到端资源协同是跨域业务生存性保障的关键挑战；

3) 自组织抗毁：传统业务生存性机制通过基于既定拓扑的业务路径计算实现，依赖于拓扑的实时获取，然而 6G 场景中天基平台的移动性和路径随机性增强。因此，针对大动态范围天地一体化网络，如何实现基于随机高动态拓扑实现自组织抗毁是保障 6G 场景中业务生存性的关键挑战。

1.2.3. 连接能力

随着全社会数字化转型的深入发展，各类互联网应用层出不穷，互联网中的流量高速增长，为光通信网络带来了巨大承载压力。面对日益增长的业务流量，当前通信网正在积极探索高带宽、低时延等方面的新型连接技术。

然而，随着 AR/VR、元宇宙和以 ChatGPT 为代表的人工智能技术的快速发展，未来天地一体化的网络空间将出现更多以“智能体互联”为代表的交互式应用。为适应空间网络 and 智能体终端的高动态性，网络在提供基础连接能力之外，还需对高动态网络和终端的位置进行精准管理，网络的服务模式也将由“静态连接”向“动态连接”拓展，进而为高速移动的智能体提供高可靠的网络连接。在连接能力方面，天地一体化网络正面临如下挑战：

1) 动态信道维持：天地一体化网络中，星间链路随着卫星的运转高速移动，链路的长度、位置等属性均呈现出高动态特征。如何针对这些动态属性进行自适应信道参数调整、维持信道的通信能力，是实现天地一体化网络动态连接能力的关键挑战之一；

2) 高速连接切换：卫星的高速移动还导致星地链路的频繁切换，进而影响承载业务的连续性。如何在高动态过程中实现无缝切换，保障无中断、无抖动的端到端服务能力，是打造天地一体化网络动态连接能力的关键挑战之一；

3) 精准定位追踪：未来，卫星与卫星之间、卫星与高空平台之间的通信将主要依赖

激光链路，而激光通信对指向性要求极高。在高动态的网络中，如何实现卫星、高空平台之间的精准定位追踪，是发挥天地一体化网络动态连接能力的关键挑战之一。

1.2.4. 智能能力

随着人工智能技术的发展，固定通信网的智能化水平已经得到了显著的提升，工作模式上实现了从人工管控、软件管控到人工智能辅助管控的变革。然而，由于网络结构和协议的繁杂，网络的管理依然严重依赖专业知识技能，传统光纤通信网所具备的智能能力（如基于人工智能的流量预测、故障诊断等）往往仅作为辅助功能，难以实现网络管控的全面自动化和智能化。

天地一体化光通信系统的规模和动态性将带来显著的挑战，传统的决策式智能技术辅助决策的有效性也会受到抑制。为了应对未来天地一体化网络的高动态管控压力，提升网络的智能化水平，天地一体化网络的智能管控技术将由决策式智能向生成式智能发展，利用网络生成式人工智能技术理解网络问题并自主生成网络管控方案，显著提升网络的自动化水平。在智能化能力方面，天地一体化网络正面临如下挑战：

1) 面向网络运维的专业大模型：将网络运维与专业大模型相融合会有效提升通用性智能程度，然而专业大模型的建立需要庞大的模型尺度、高昂的存储和计算资源成本、复杂的模型调参和优化能力，是天地一体化网络中大模型构建的关键挑战之一；

2) 基于生成式智能的管控应用：在专业大模型的基础上，针对天地一体化网络中的生成式智能需要具有多模态、全领域知识的同时，也对准确性和恰当性提出了严格的要求，如何基于生成式智能开发稳健的管控应用是发挥智能能力的关键；

3) 智能化应用与人的协作关系：智能化应用在辅助人进行智能管控的同时，也会势必带来由于自动化操作而导致的误差和风险，如何实现智能化过程中 AI 与人的有效协作，规避误操作而导致的风险，是智能化过程中所面临的关键技术挑战之一。

1.2.5. 安全能力

目前，固定通信网络中安全技术标准与应用均已成熟，主要依靠经典密码学实现信息的加密，以实现面向信息的安全保护能力。但是，随着量子计算技术的持续突破及人工智能技术的广泛应用，基于信源加密的安全体系正面临“先存储再破译”等攻击方式的威胁。

特别地，未来天地一体化网络将部署大量的卫星节点到公共空间，开放的通信信道将面临更多未知的安全威胁和挑战。因此，需要进一步推动天地一体化网络的安全架构升级，实现安全体系从“信息安全”到“信道安全”的增强，利用物理信道级的安全防护措施，提升信息传递的隐蔽性和安全性。在安全能力方面，天地一体化网络正面临如下挑战：

1) 物理信道加密：在天地一体化网络中，星地通信的传输性能受到发射功率、跟踪误差和其他各类干扰的影响，卫星设备部署成本高，灵活性大，且需要与地面站进行协同管理。如何设计低功耗、高兼容的物理信道加密方案，实现星地之间高速安全传输，是天地一体化光通信系统面临的安全能力挑战之一；

2) 高速密钥协商技术：天地一体化网络传输依靠空间激光，链路跨距长、传输媒介为开放空间，使得安全地在各类节点之间分发密钥变得复杂。如何高速且安全地在空天一体化网络中实现密钥分发，是天地一体化光通信系统面临的关键挑战之一；

3) 安全风险感知技术：与传统固定网络相比，天地一体化网络的动态性和复杂性使得准确感知和评估整体安全风险变得困难。庞大的互连组件数量，包括卫星、地面站和控制中心，增加了攻击面和潜在的风险。如何实现对安全风险的主动感知，是天地一体化光通信系统面临的关键挑战之一。

2. 天地一体化网络发展需求



图 3 天地一体化固定通信网（F6G）技术范畴

面向未来高动态、交互式网络应用，基于天地一体化的 F6G 网络将在感知、接入、传输、组网与呈现方面呈现出新的需求和发展趋势，如图 3。

2.1. 高速率全域接入

目前，陆地移动通信服务的人口覆盖率约为 80%，但受制于经济成本、技术等因素，仅覆盖了约 20% 的陆地面积，小于 6% 的地表面积。未来，天基卫星通信网将成为地面固定网络之外的第二张接入与传输网，在提供广覆盖能力的同时，还将作为地面固定网络的补充，承载越来越多的互联网流量，如图 4。传统地面固定光通信网在覆盖范围内的接入能力已经非常可观，而卫星通信网络覆盖范围内的接入能力还比较有限，发展天地一体化网络需重点提升覆盖范围和接入能力。

2.1.1. 广覆盖

卫星光通信与地面光通信技术互为补充，可共同构建覆盖全球的天地一体化光通信系统。在覆盖能力方面，陆地人口密集区域用光纤接入网覆盖，发挥无源光网络的接入容量优势；偏远地区与无人区域则采用卫星覆盖，充分发挥卫星的覆盖能力优势。天地一体化光通信系统将融合地面固定网络、卫星通信网、自由空间光通信的技术优势实现面向物的无缝覆盖。

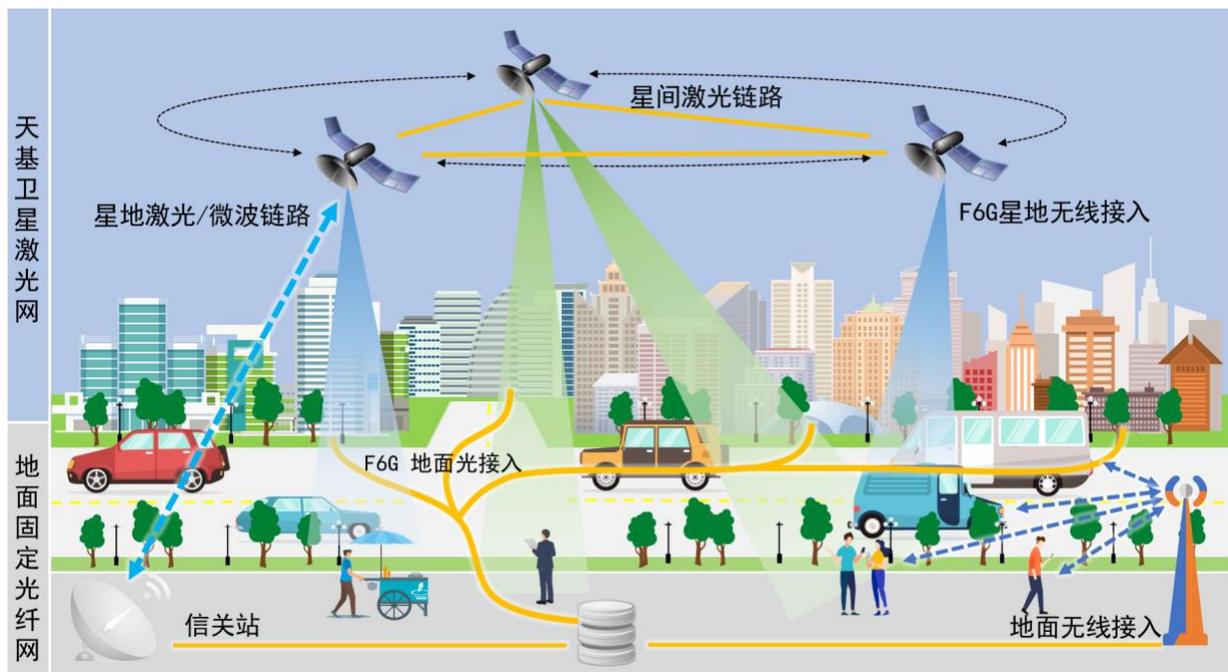


图4 天地一体化固定通信网（F6G）全域覆盖接入能力示意图

地基网络覆盖面积扩展：需重点发展 FTTR 或 FTTM 技术。FTTR 即光纤到达每个房间将使用室内光纤代替现有的网线布线方式，结合下一代 WiFi 或太赫兹接入技术将有望扩展覆盖面积。从 FTTR 走向 FTTM，将进一步提升接入网的覆盖面积。地基接入网覆盖范围将突破传统的家庭宽带业务，走向全光园区、全光工厂、全光校园等新的宽带光接入场景，进一步实现面向大规模全光物联网的发展。

天基网络覆盖面积扩展：除了增加卫星数量以外，可以高轨、中/低轨卫星通信星座为基础构建多层通信网，以扩大全球覆盖面积。天基网络的覆盖范围主要取决于网络结构和通信技术。网络结构方面，可通过优化星座轨道与网络拓扑方面实现覆盖面积的提升。对于通信技术，天基网络以星间激光通信为主，星地通信以毫米波与极高频传输为主，结合无人机、飞艇等空中平台的自由空间光通信，共同提升天基网络对数据链路的管理能力，扩大覆盖范围。

2.1.2. 大带宽

传统卫星通信技术以数据通信和中继为主，主要用于服务专业型应用，业务数量少、接入速率低，在接入能力上属于天基窄带通信系统。未来的低轨卫星通信网将面临大量的

智能网络终端和各类互联网业务，需提供 Gbps 规模的宽带接入能力。

提升天地一体化光通信系统的接入能力，需要实现高低轨卫星及地面的联动接入和天地基资源的灵活调度，以支撑天地接入系统的优势互补，推动当前“地基宽带+天基窄带”接入能力向“地基宽带+天基宽带”的方向增强。

提升天地一体化光通信系统的接入能力，还依赖于光电信息理论和集成高带宽通信和高精度探测遥感技术。考虑到深空探测中继、海洋信息融合、地球引力场测量等前瞻性应用场景，用户侧需要研发高性能、多模式、小型化、低功耗的新型卫星智能信息终端，进而支撑 F6G 网络天地一体化的深度融合，实现天地网络的智能弹性接入和无缝切换。

2.2. 大容量安全传输

天地一体化网络将实现空天地海的全时全域互联，连接终端数量与承载的数据量将急剧增强。同时，星间和星地的通信链路穿越开放空间，也面临被截获、被入侵的风险。未来，天地一体化的通信网络需具备大容量安全传输能力，如图 5，以保障安全高速互联。

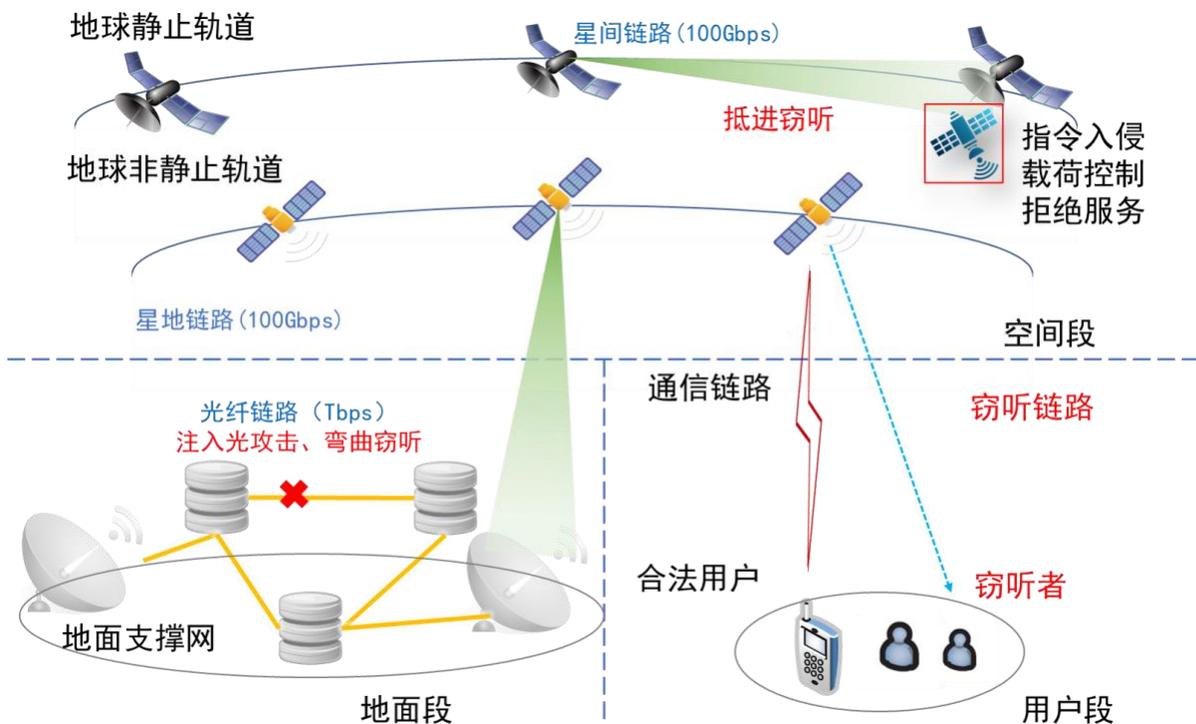


图 5 天地一体化固定通信网（F6G）传输示意图

2.2.1. 大容量

传统网络容量面向单一网络场景，只需要保障当前网络所承载的业务流量需求，不支持空基、天基、地基等多网络融合的业务需求。为了应对天地一体化网络多网络融合带来的流量急速增长问题，未来天地一体化网络将在传输和交换方面同时向大容量方向升级。

多波段传输：通过拓展光传输系统的频谱带宽（即多波段光通信技术）的方式进行扩容。主流的光传输系统都是基于 C 波段（即从 1530nm-1565nm，约 35nm 的光纤频谱）。然而，标准单模光纤的低损耗窗口事实上远大于 35nm，其它波段（如 O、E、S、L、U 波段）在光纤损耗上会略高于 C 波段，但仍在 0.4dB/km 以下的低损耗范围内，其均可进行有效的通信，具有很强的扩容潜力。

全光交换技术：具有高带宽、低时延、低能耗、可重配等优势，是实现大容量交换的关键技术之一。使用光交换机进行组网互连，为不同类型业务流提供连接服务，既可以克服电子瓶颈，又可以在进行大规模组网时满足业务低时延，低能耗等要求。

2.2.2. 高安全

传统网络通过基于数学复杂度的加密算法在上层对数据进行加密，并配合防火墙、介质访问等技术实现网络安全，而底层的传输系统则提供透明的传输服务。为了应对天地一体化网络开放空间带来的安全风险，未来天地一体化网络将在物理层进行安全体系升级，天地一体化网络由“信息安全”转向“信道安全”。物理层“信道安全”技术基于信道的物理层特征实现密钥分发和数据加密，并通过监测物理层特征识别潜在的攻击行为。

物理层安全加密：天地一体化网络的开放性、高覆盖范围和广播特性为窃听者提供了天然的窃听条件，使得信息传输容易被窃听和干扰，并且恶意攻击者的藏匿空间更大，因此需要物理层信道加密来抵抗这些攻击。物理层信道加密利用无线信道的唯一性、时间可变性及空间去相关性可极大地提高非法方的入侵与截获难度，从而保障天地一体化网络的通信可靠性。

物理层密钥协商：在空天地一体化网络中，不同的设备和系统需要相互通信和交换数据，只有获得相应的安全密钥才能进行通信数据加密，确保数据在传输过程中的安全。

密钥的动态更新和有效的密钥管理对于维持通信和数据传输的安全至关重要。安全密钥分发系统应当能够实现安全、高效的密钥更新和管理。

信道异常检测：天地一体化开放光网络具备范围大和规模大的特点，并且面临严重的安全威胁，尤其在物理层发生的攻击问题，如窃听和干扰。传统上用于光纤网络的检测工具，如光时域反射仪（OTDR），其在广域通信链路中的应用存在一些限制，例如检测距离有限、成本较高等。在天地一体化的场景中，需要低成本高覆盖的信道异常检测方法，以连续监测一体化链路并及时定位任何网络攻击。

2.3. 高动态智能组网

天地一体化的网络具有高度的动态性。一方面，天基网络相对于地面网络汇聚点和用户终端处于高速运动状态；另一方面，天基网络的卫星节点彼此间也处于高速运动状态。以上快速移动特征对组网技术提出了新的挑战，要求网络具备高动态智能组网能力，以支撑天地一体网络提供端到端无间断的通信服务，如图 6。

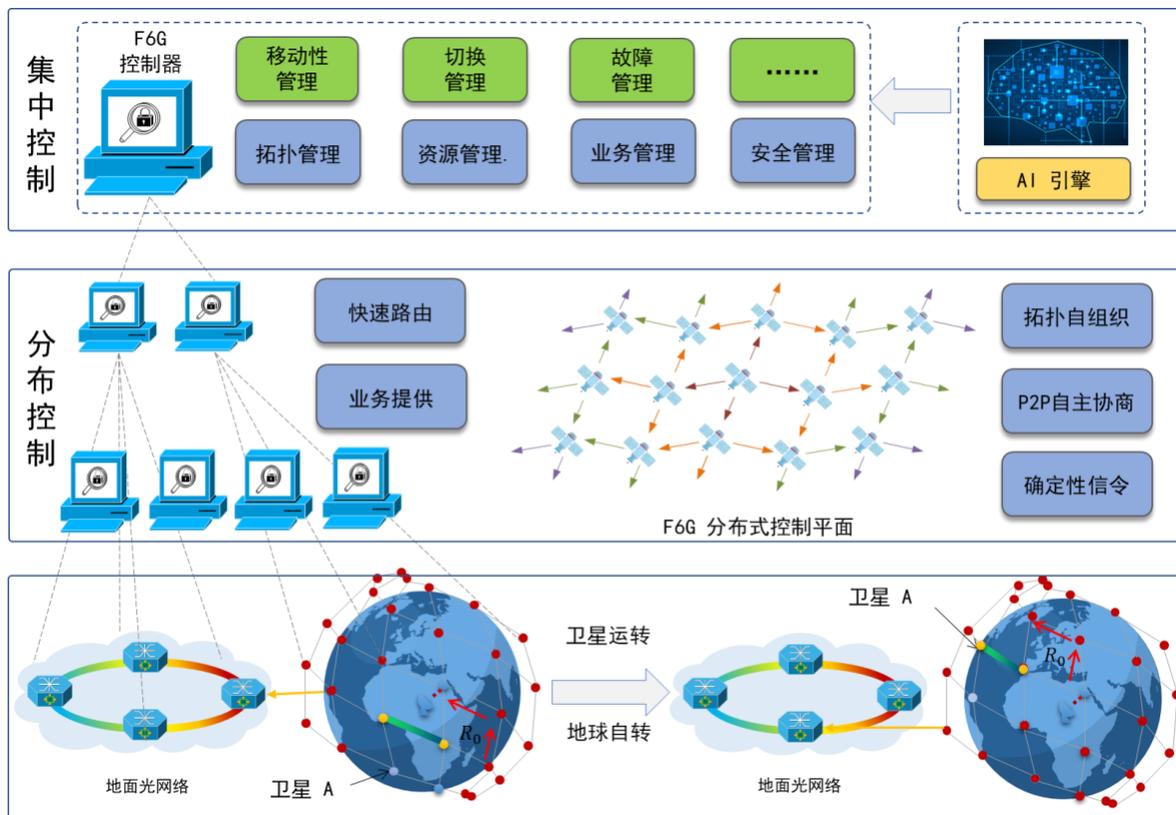


图 6 天地一体化固定通信网（F6G）高动态组网能力示意

2.3.1. 强智能

网络的智能化能力通常指人工智能技术增强的网络自动化管控能力。基于人工智能的自动化网络管控技术在传统的网络中已有诸多研究，但多属于决策性人工智能，主要用来做流量预测，故障诊断等。天地一体化的网络规模与动态性将显著提升，对管控精准性与时效性要求更高，亟需构建基于生成式人工智能的天地一体化强智能组网能力。

智能拓扑管理：在高度动态的网络中，传统的被动式拓扑管理机制的性能与效率将急剧劣化甚至不再适用，亟需发展基于人工智能的主动式拓扑管理技术，支撑网络拓扑的精准预测、链路自适应调整与编码、星地高动态链路无缝切换等拓扑管理任务。

智能流量调度：在天地一体化网络中，通信流量会受到网络动态性的显著影响，亟需发展针对高动态性的智能化流量调度机制，建立动态流量时空分布预测模型，支撑差异化服务质量保障、自适应负载均衡、星地连接端到端协作等流量管理任务。

2.3.2. 高可靠

传统的网络生存性技术通常指网络业务的恢复能力，在网络出现故障时实现业务自动恢复。天地一体化网络面临天基网络大面积设施故障或损毁的生存性风险，亟需具备自组织能力的新型生存性技术，支撑网络节点根据环境的变化和其他节点的状态来进行轨道调整和拓扑重构，通过自动化组网增强网络自愈能力。

拓扑自组织：为构建天地一体化网络的自组织能力，首先需要发展大尺度空间网络的自组织协议，以实时监测并同步网络状态变化，按需进行星间、星地链路重建，支撑网络在故障后通过网络结构自主调整保持良好服务的能力。

链路自适应：天地一体化网络的自组织在重构拓扑的同时还要保障通信链路的可用性，因此还需要发展动态链路的自适应管理技术，根据链路状态自适应调整调制格式、编码格式等链路属性，使网络能够在故障中保持最大化的通信能力。

2.4. 多模态主动感知

天地一体化网络具有高吞吐量、广覆盖特性。如图 7，天地一体化网络可以有效增强多模态感知能力，基于广域覆盖网络的感知可以实现位置、速度、空间、光谱等多模态信

息的获取。同时，多模态感知也可以提高网络智能化水平。通过多模态感知，可以全方位检测、分析网络的参数和环境，推动自适应组网、动态路由和智能调度的实现。一体化网络的多模态感知能力将成为催化网络新应用的关键技术。

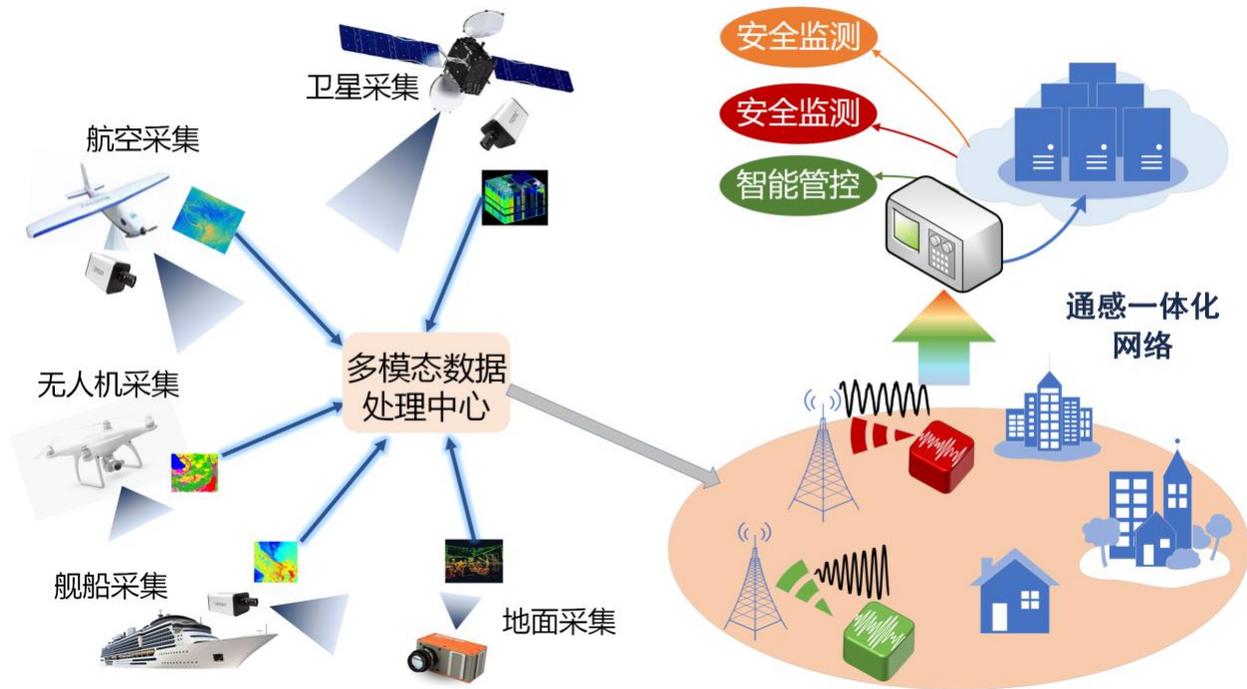


图 7 天地一体化固定通信网（F6G）多模态感知能力示意

2.4.1. 通感一体

通信感知一体化是指通过频谱或硬件共享等手段，实现通信和感知功能一体化的原生设计，从而使得通信网络在进行信息传递的同时能够感知多模态信息。通感一体化系统通过检测、跟踪、识别、成像等手段，已经为人机互联、智慧城市等领域提供了重要技术支持。天地一体化网络的发展将进一步增强对智能通信网络与多模态融合感知的需求，从而提升通信系统的综合服务能力。

智能通信网络：传统的通信网络无法根据信道状态、设备条件、环境条件等因素自适应调整网络配置。在大规模高动态天地一体化网络中，需要自适应的网络配置调整并具备高可靠高容错能力，从而提供更好的服务质量，并提高资源利用效率，确保网络的稳定性和可靠性，构建智能的通信网络体系。

多模态融合感知：多模态融合感知需要通过对多类型传感器与数据的融合，为用户提供更丰富、更精准、更智能的服务。另外，由于天地一体化的大规模网络架构及大容量需求，需要在保证通信质量和感知功能性需求的前提下，研究结构精简、复杂度低的新型通信感知系统，以提升系统感知性能，促进数据共享和协同工作，支持未来新型业务场景。

2.4.2. 主动感知

通感一体技术中的主动感知是指系统能够主动获取和处理多种感官信息以实现更全面的感知。经典的光传感技术通常工作在“被动”感知的模式，基于传感系统参数与环境变化模式的关联模型，通过对传感参数的实时监测，实现对外部环境的被动式感知。主动感知的需求包括主动探测型感知设备与传感器统一管理平台。主动探测设备能主动获取感知信息，统一管理平台可以协调、整合多模态感知数据，为用户和应用提供更全面、高效的感知体验和数字化管理能力。

主动探测型感知设备：主动化感知能力的实现离不开探测型传感设备，它们具备多模态感知的能力，可以按需采集各种感知元素，包括视觉、听觉、触觉等，从而为未来新型交互式网络应用提供关键支持。这些传感设备的多功能性和可编程性使其能够灵活适应不同的使用场景，满足用户和应用的各​​种需求。

传感器数字化管理平台：主动化感知能力还依赖于对传感器的统一管理平台，以确保感知设备的协同工作，数据的协调整合，以及对多模态感知元素的高效管理。在天地一体化网络中，这一管理平台为全球范围内的感知设备提供了统一的标准和协议，以确保设备之间的互操作性，有助于实现感知数据的无缝传输和集中管理。

2.5. 超时空全息呈现

随着内容产业的进步与消费经济的发展，各行各业对三维显示的需求逐年增加。然而，为了实现高真实性和高沉浸感的新型三维显示技术，需要三维呈现设备具有光场数据量大，互动实时性强等特点，导致该技术对通信网络有着极高的需求。借助大容量低时延的广域信息传输能力，结合新型的三维显示技术，未来的通信网络将提供时间和空间上可无缝衔接的超逼真呈现能力，给用户身临其境的场景和体验，如图 8。在天地一体化网络中，超

时空呈现能力将充分连接三维空间的人和物，赋予用户更加丰富的交互和探索能力，支撑远程的游戏、教育、娱乐、医疗等活动。

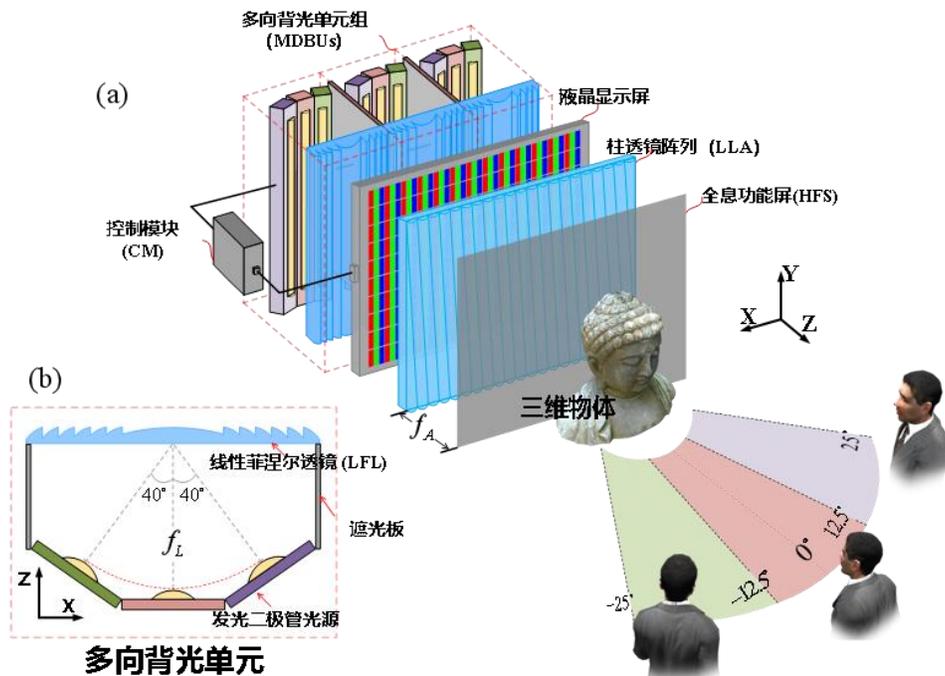


图 8 天地一体化固定通信网（F6G）超时空呈现能力示意图

2.5.1. 裸眼 3D

裸眼三维呈现是对裸眼呈现 3D 场景的技术，可使得观看者可以更加精确地捕获相关信息，准确地进行现场判断。相较于传统二维图像传输像素信息，精确传输三维图像信息中的体素信息提升了大约三个数量级的传输需求，现有的网络传输能力无法支撑裸眼 3D 的大规模应用。在传统视频图像等呈现的基础上，裸眼三维呈现的通信终端带来的高真实性和沉浸感以及通信的实时性特点对网络提出了更高的要求。

与传统高清和 3D 虚拟视频相比，裸眼三维呈现传输的流媒体对网络带宽的需求将达 Gbps。并且，随着传感器分辨率和视点数量的增加，在更高的分辨率和帧速率下，尤其是高精度量子传感器的应用，对网络带宽的需求会更高。

裸眼三维呈现首先需要通过采集端设备获取对象信息，计算处理后，经过编码压缩进行网络传输，在终端侧解码渲染并显示三维影像。为了减少整体时延，需要处理节点具有

高算力，并进一步缩减网络本身的传输时延。

2.5.2. 通呈联动

传统的通信网提供管道式的数据传递能力，为呈现端提供数据支撑，其大规模信息传输的实时性方面仍无法达到三维显示通呈联动的需求。三维显示采集信息量极大，且多维度信息超远距离传输需要保持高度的同步性，其通信协议也难以满足现有三维显示技术通呈联动的实时交互。未来的超时空呈现类应用将对通信与呈现系统的性能提出更严苛的要求，推动通信与呈现系统的联动化。相比传统网络的通信与呈现独立服务的方式，通信与呈现联动的技术将实现通信与呈现系统的需求互感与交互式写作，进一步精准控制呈现的实效性和逼真性。

通信呈现联动需要各个维度的信息保持严格同步，并且在业务传输过程中，来自不同传感器、不同维度的各个并发媒体流之间需要保持相当严格的同步。并且，还需要对多维度的信息进行智能化的管控。

通信呈现联动需要交互式通信协议的支撑，实现连接感知的视频传输和呈现感知的智能通信。因此，通信呈现联动依赖更加智能和高效的编解码技术，用以缓和多种维度资源联动过程的控制信息时延和抖动。

3. 天地一体化光通信关键使能技术

面对天地一体化光通信技术面临的技术挑战，针对天地一体化光网络接入、传送、组网、传感与呈现方面的新型需求，以下技术将支撑未来天地一体化光通信。

3.1. 接入技术

3.1.1. 有线接入

下一代 PON 技术是指下一代更高速率、更大容量、更灵活和更广覆盖范围相干光接入网络，用于将光信号传输到用户家庭或企业。随着下一代互联网、云计算、物联网、5G/6G、4K/8K 高清视频等新兴业务的蓬勃发展，光纤接入网，作为连接人、物和云互联互通的“最后一公里”，正在演绎一场更高速率、更大容量、更灵活和更广覆盖范围的深刻变革。目前，ITU-T 已经发布了 50G PON 的标准，而针对 50G PON 之后的接入网研究也已经准备启动。后 50G PON 时代的接入网，单波速率预计将向着 100G 甚至 200G 发展。对于如此高的传输速率，传统的直调直检方案很难达到接入网功率预算的要求。具有更高频谱效率和更高接收灵敏度的相干技术，开始逐步向短距应用中渗透。为了满足接入网功率预算的要求，将相干技术引入接入网，得到了越来越多研究人员的关注。下一代 PON 需要的关键技术包括：支持高速传输的相干算法，突发模式相干接收以及多维复用技术。

支持高速传输的相干算法：在相干探测方面，主要包括降低高速器件的数量、带宽及线性度的需求，通过先进的线性和非线性算法进一步降低对器件带宽和线性度要求。相干接入基础架构和复用方式上，可引入 FDM 或 TFDM 等新型点到多点相干接入架构。此外，时分复用系统一大挑战在于上行突发模式相干接收。不同于传统连续相干探测，亟需新的高效信号处理方法，如突发模式相干接收。

突发模式相干接收以及多维复用技术：针对未来 6G 移动前传、F6G 宽带光接入、全光园区、工业互联网等大带宽、多场景、灵活接入场景，需要重点解决下一代超 100G 或 200G 光接入灵敏度受限和动态范围受限问题。相关关键使能技术包括新型点到多点、低成本低复杂度、灵活接入、多维复用的 200G+相干多址接入技术，多维多址相干光接入架

构，超大动态范围光接入和基于星座整形的灵活光接入技术，实现可变速率的灵活相干光接入。通过引入基于机器学习，实现人工智能赋能的端到端优化，有望实现联合线性和非线性 ISI 均衡来进一步提升接入速率。通过多维相干接入，突破面向时域、频域、功率的多维度复用机制，实现高性能、高灵活和高智能的上下行双向传输。

3.1.2. 无线接入

在未来天地一体化的光通信网络中，卫星网络的角色将不再只是地面网络的补充，还将进一步与地面网络融合。无线接入技术在天地融合的网络中将发挥关键的作用，一方面，无线接入技术起到了移动终端入网的接入作用；另一方面，无线接入技术还起到了卫星网络与地面网络的互联作用。不同于地面网络的无线接入技术，面向天地一体化网络的无线接入技术将沿着多技术融合、多频段共享的路线演进，相关的技术包括：天地融合 5G/6G 技术，大容量微波通信技术。

天地融合 5G/6G 蜂窝通信技术：是传统无线通信技术面向天地一体化网络的延伸，旨在通过升级卫星通信终端的通信技术，为地面消费级终端提供卫星直连服务。天地融合 5G/6G 蜂窝通信技术主要面临两方面的挑战。一方面，卫星要发挥蜂窝网络基站的作用，其难点在于要克服 5G/6G 频段信号的远距离传输问题。大天线低频率的移动通信技术可以克服长途传输的衰减问题，有望成为支持 5G/6G 手机直连卫星的有效解决方案。另一方面，卫星基站与地面基站要具备协同服务能力，其难点在于天地一体化网络的智能敏捷管控能力。特别是面对高速移动终端的接入与切换需求，大尺度网络下的集中管控模式将面临严重的信令时延问题，将催生天地基站之间的分布式协作信令与管控机制。

大容量微波通信技术：既可以支撑专用卫星终端宽带接入，也可支撑地面信关站与卫星网络高速互联。大容量微波通信技术主要面临两方面的挑战。一方面，用于卫星微波通信的频率受限。为满足卫星通信的不断增长的需求，需进一步挖掘更高的频率，如 Ka 和 V 频段。然而，更高的频率将面临更严重的大气衰减影响，需要新型的补偿技术。另一方面，传统的通信卫星容量较低，无法适用于消费级互联网的流量需求。高通量卫星技术使用诸如射点波束技术、频率重用等技术，可显著降低信道之间的干扰，使可用带宽大幅增加，从而实现更高的数据传输速率。

光载无线技术：具有传输距离远，抗干扰，容量大，失真度小等优点，因此适用于卫星终端宽带接入和地面信关站与卫星网络的高速互联。光载无线技术主要面临两方面的挑战。一方面，在光学域中传输卫星信号会使其受到噪声和链路非线性效应的影响，从而可能限制整个链路的动态范围。这种非线性效应的存在需要未来加强对系统链路的非线性补偿研究，以扩大链路的动态范围，从而进一步提高系统性能和信号质量。另一方面，采用模拟传输系统容易受到信号损伤的影响，例如噪声和失真。这在要求高质量信号的光通信和卫星网络应用中可能导致信号质量下降。需要使用高质量的光电器件和信号处理技术来减小噪声和失真。此外，采用适当的信号纠错和调制技术也可以提高信号的可靠性。

3.2. 传输技术

3.2.1. 多维复用光传输

在天地一体化的 F6G 光网络背景下，全球流量的年复合增长率预期将高达 30~40%，单根传统单模光纤的极限传输容量为 100Tb/s，现有的光通信系统中的 OTN 基础设施将无法满足不同信息流量的需求，光纤通信技术亟需从传统的 C 波段波分复用升级为多维度高效复用。全波段光传输是通过扩展光纤的有效频谱资源来提升单纤传输容量，除了传统的 C 波段和 L 波段外，还可充分利用 S 波段、U 波段等频谱资源，在长距离下实现单纤 100Tb/s 的传输容量。空分复用中现有较为成熟的方案包括多芯和少模的技术路线分支及两者的结合，将传统单模光纤的单路升级为多路并行，以显著提升光纤的传输容量，有望在天地一体化的 F6G 光网络中将光纤通信传输容量逼近 Pb/s 级。尽管多芯和少模光纤制备及超大容量空分复用传输系统技术已经取得重大的进步，但在空分复用部署到 F6G 光网络之前，关键器件和技术仍然面临巨大的挑战。支撑多维复用光传输的关键技术包括：新型波段光放大器、新型空分复用光纤的设计和制备，大规模空分复用光器件的设计和制备，光电协同的大规模并行通道的低功耗高性能损伤均衡。

新型波段光放大器：新波段光放大器，如 S 波段掺铽、掺铋光纤放大器、U/E 波段掺铋光纤放大器、超宽带半导体光放大器等是近期的研究热点，是实现扩谱首先要突破的关键技术。新波段光放大器依赖新型的掺杂元素配方、新型的掺杂光纤制备工艺以及新型的光放大器架构。铋离子具备独特的宽谱发光特性，掺铋光纤在未来超宽带光放大器器件中有

望扮演重要的角色，但当前铋离子相关的近红外发光机理仍需进一步探索。半导体光放大器则需要探究新的组分与调控机理以抑制非线性畸变、提升饱和功率并降低噪声指数。

新型空分复用光纤：主要包括多芯和少模光纤，需要从串扰、模式耦合、多路干扰和衰减等变量以全局优化的角度确定最优的设计方案。弱耦合空分复用多芯光纤能够极大的降低接收端 DSP 均衡的复杂度，最有可能在 F6G 光网络中被铺设部署。此外，还需要对少模传输中的差分模式群时延（DMGD）进行重点优化设计，可以结合新型弱耦合的多芯少模低 DMGD 光纤逼近 Pb/s 级传输容量的特性。此外，需要不断优化特种光纤的预制棒制备和拉制工艺的升级，开发低成本的工艺进行多芯和少模光纤的批量生产是推动空分复用传输技术在 F6G 光网络商用的关键。

新型光通信器件：空分复用大规模并行将对目前的商用光器件提出更高的要求，主要包括收发器阵列、低成本的复用和解复用元件、能同时放大多模和多芯信号的光放大器、精密耦合/连接器。器件的加工难度甚至不亚于空分复用光纤。收发器件阵列可以结合目前发展较为成熟的硅基/薄膜铌酸锂/InP 等集成光子工艺，进一步优化产品良率和集成密度，开发适用于空分复用传输技术的收发器件阵列。在多芯/模式耦合的背景下，对复用/解复用及耦合/连接器这类无源器件的制备提出了更严峻挑战，光纤束熔融拉锥、平面波导及新型超表面维纳结构相位操控的多模式无源器件需要被进一步研究。支持放大多模和多芯信号的光放大器是推动空分复用传输技术中最重要的器件之一，模式和芯的分离放大将导致系统的体积和功耗显著的增加，如何实现低串扰和增益均衡的放大是关键，可结合目前成熟发展的特种增益光纤并结合衰减调控集成波导阵列对串扰和增益均衡进行优化。

损伤均衡技术与关键算法：模式/芯内部及相互之间串扰的损伤均需要在接收端被均衡补偿，传统的光纤通信技术中需要借助于多输入多输出(MIMO)的数字信号处理技术来实现对以上损伤的补偿。在超大容量传输的背景下，MIMO 的规模数将显著增加，对接收端 ASIC 芯片的制程将提出更高的要求。光电协同的方式可以有效的解决 MIMO 算法对 ASIC 芯片高制程的要求，并能显著降低 ASIC 芯片的功耗。其基本思路是通过光信息处理的方式将芯/模式间串扰部分甚至全部补偿，显著降低 MIMO 算法的规模和均衡滤波器的抽头长度，实现的难点在于如何实现快速的光信息处理损伤补偿。随着对光计算领域的深

入研究和集成光子学技术的发展，有望结合光计算的方法实现全光片上 MIMO 解复用的运算，实现光电协同的大规模并行通道的低功耗高性能损伤均衡。

3.2.2. 空间激光传输

空间激光传输技术是指利用激光束作为载波在空间直接进行信息传输的一种技术。卫星之间（星间）以及卫星到地面站之间（星地）的空间激光传输技术，是天地一体化网络中大容量卫星间通信以及卫星对地面通信的重要实现手段。F6G 网络广覆盖、大带宽对空地一体化网络的速率和容量提出更高的要求，传统基于微波的通信系统容量已经达到极限，难以进一步提升，空间激光传输技术具有宽带宽、大容量、高速率、天线体积重量小、功耗低等优势。基于空间激光传输技术，可以将天基卫星网络的链路容量从现阶段的 1~5Gbps 提升到 100Gbps 以上，极大提升天基互联网的业务承载能力。空间激光传输技术包括高质量光学系统设计及高精度捕获跟踪瞄准技术、星地链路大气影响补偿技术、高功率通信发射和高灵敏度通信接收技术。

高质量光学系统设计及高精度捕获跟踪瞄准技术： 该技术是确保空间激光传输的关键，通过近衍射极限角的光学系统设计和多光轴一致性的装调技术，降低光学系统的耦合损耗和传输过程中的几何损耗。由于空间激光传输的通信终端之间的高速相对运动特性，需要通过捕获跟踪瞄准（ATP）技术在相对运动的通信终端之间建立并保持一条光通信链路，ATP 技术的难点在于极远的通信距离要求 ATP 系统能够进行高精度的光学对准，高速运动的卫星有限的过轨时间要求 ATP 系统能够快速捕获并建立链路，此外 ATP 还需应对卫星平台的震动和星地链路中的大气湍流带来的光斑漂移等问题。ATP 技术可采用信标光指向辅助和无信标光的方式实现跟踪和瞄准，包括捕获跟踪和对准跟踪技术。

星地链路大气影响补偿技术： 激光束在大气中传输时，会受到大气信道的的影响。大气吸收和大气散射会造成激光能量的衰减，进而影响激光能量；大气湍流散斑和大气湍流闪烁会影响激光质量，如光斑中心漂移和波前畸变等。以上情况会影响空间激光通信效果，严重情况下会导致无法通信。因此，需要通过星地链路大气影响补偿技术降低大气对激光光束波前相位基本、功率抖动等影响，提升空间激光通信的可用度。大气影响补偿的难点

在于大气信道的随机开放特性导致大气影响的空间和时间随机性补偿困难。大气影响补偿技术包括自适应光学、空间分集发射和接收、模式分集接收、特种光束等。

高功率通信发射和高灵敏度通信接收技术：由于空间激光通信通常距离远，且无法中继，发射信号经过长距离传输后损耗巨大，导致接收后信号信噪比急剧恶化，对通信发射和接收技术提出挑战。一方面，通过提升发射端的发射功率来补偿长距离无中继传输带来的损耗。另一方面，在接收端，通过高灵敏度接收技术，降低所需接收功率的要求，提升接收信号的信噪比，进而确保激光通信系统具有充足的链路余量。大功率发射技术主要通过高功率的有源光纤放大实现，高灵敏度接收技术包括高能量效率的调制方式和高精度的数字信号处理技术。

3.2.3. 物理层内生安全防护

在天地一体化网络中，空间激光链路极易遭受攻击者的窃听和拦截，从而导致敏感信息的泄露，这对天地一体化网络的安全性提出了极高的要求。与传统的网络安全技术不同，空间激光内生安全技术不依赖于附加的外部密钥分发和安全监测，由通信系统自身对数据传输提供内源式的安全防护，可基于统一的空间信道同时实现安全传输和密钥协商，并监测激光链路的安全状态，核心技术包括加密传输、密钥协商和信道异常检测。

加密传输：作为最重要的安全传输技术之一，通过使用加密算法，将信道中的信号进行变换，合法接收方拥有密钥才能还原原始信号，保障信号在传输过程中无法被未经授权的非法接收端读取。天地一体化网络中通信网络模型具有空间跨度大、时延长、信道反馈链路信道较少的特性，物理层加密需要高效的算法，在保持高安全性的同时，降低对传输性能的影响。针对这个问题，可以通过选择经过充分验证和优化的加密算法、使用数据压缩和优化技术减小加密数据量、设计更好的编译码、设计更好的调制方案等方面解决。

密钥协商：一种在通信合法方之间协商和生成共享密钥的过程。密钥协商的目的是让空天地一体化各终端能够使用相同的密钥进行加密和解密，从而实现加密通信。如何在合法方生成具有高度一致性并且高安全性的密钥是密钥协商的难点。在经典信道中利用误码率、光强度和相位等物理层特征能提取出高一致性的安全密钥，这类方法主要依赖于自由空间环境的变化对激光产生的影响，具备高兼容性和高速率的特点，可以满足高速率的

加密通信。但是，在安全性和一致性方面略显不足。隐私放大是用来提高一致性的有效手段，一般采用纠错编码不一致的密钥，然后舍弃因为信息交互而可能泄露的密钥。

信道异常检测：天地一体化信道异常检测旨在辨识和检测可能存在的恶意攻击行为，从而增强通信的安全性。它将数据的安全性与通信的物理层特征密切结合在一起。当网络受到攻击时，往往会导致信号状态的异常，例如信号强度、相位的异常波动或频谱特征和传播延迟的变化。这些异常可以在整个一体化链路上通过机器学习等方式进行监测，这意味着该技术具有更广泛的覆盖范围，且不需要额外的硬件设备，降低了检测成本。因此天地一体化信道异常检测技术可以令天地一体化开放光网络更好地应对各类网络攻击。

3.3. 组网技术

3.3.1. 智能管控架构与协议

卫星光通信网络在时间及空间上的分布尺度远超过地面光通信网络，卫星节点高速运动带来的卫星连接关系和网络拓扑动态变化使得地面光通信网络的管控体系架构不再适用。此外，天基通信应用模式在时空分布特点、带宽、时延要求方面和地面互联网应用模式也存在显著差异，需要探索不同的网络管控机制为其提供支撑。发展 F6G 天地一体化光网络，需要设计面向高动态大尺度网络的高效管控架构与协议，涉及的技术包括：集中与分布式协同的管控架构，快速路由与信令协议，动态网络自组织与无缝切换协议等。

集中与分布式协同控制：是一种管理天地一体化大尺度高动态通信基础设施的新型架构，其核心是充分结合中心化控制与分布式控制的优势，以兼顾全局网络与业务管理的效率与高动态环境中分布式协作的可靠性。该架构的挑战在于集中式与分布式功能的平衡与备份，以确保中心化系统不成为瓶颈或单点故障，同时为分布式节点提供足够的自主权来响应实时变化。面向天地一体化光网络的控制架构将涉及多个层次的集中与分布式协同。在集中式方面，大规模网络可通过分域管控的方式来进行层次化集中式协同，同级的集中控制单元也需要进行高可用备份。在分布式方面，网络设备可进行分布式协作，同级的集中控制单元也将具备分布式协作的能力，以应对高层控制单元的故障。新的协同架构中，先进的人工智能技术也将发挥更大的作用，一方面增强对网络动态性、故障与流量等属性的预测能力，另一方面充分发挥生成式能力，增强网络的自动化配置与运维能力。

路由和信令：是支撑天地一体化光网络拓扑、资源与业务管理关键基础协议。天基网络卫星节点的动态性导致网络拓扑将持续动态更新，传统的路由技术将使网络不断针对连接关系的变化进行泛洪，严重影响网络的可用性；同时，天地一体化的大尺度网络传输距离较长，导致控制信令时延较大，也会导致服务效率的下降。快速路由和信令技术旨在突破动态性和大尺度的约束，实现快速的路由收敛与信令传递。在路由协议方面，完全分布式的泛洪路由方式将不再适用，分域治理与集中式路由信息同步是两个可行的方向，同时基于人工智能的预测性路由更新技术也将助力实现快速的路由收敛。在信令技术方面，大尺度带来的传播时延无法缩短，但使用确定性的信令技术可在信令转发过程保障信令消息的优先级，进而压缩转发时延、补偿额外的传播时延，实现低时延的信令传递。

自组织和无缝切换协议：主要用于自动化响应高动态网络的物理节点与链路的可用性变化，以保持连续通信能力。在天地一体化的动态网络环境中，卫星节点一方面面临故障时效的风险，另一方面其动态性也使其与地面站的连接关系动态变化。如何通过网络结构的调整或接入点的切换最大化网络的连续服务能力是关键。面向故障的场景，一颗或多颗卫星以及相关的链路将同步失效，其他邻居卫星节点可通过点对点的分布式协议对可用临近卫星进行搜索与定位，并使用自匹配算法计算新的链路并自动进行链路重建。面向切换的场景，可以采用人工智能预测技术预测即将到来的切换，在当前链接断开之前与下一个节点预先建立连接，结合缓冲同步技术在切换期间缓存关键数据，保障数据连续性。

3.3.2. 光电混合交换技术

星间网络可实现不同类型应用卫星的互联、跨区域的实时数据通信，天基卫星骨干信息网络需要为不同类型用户提供稳定可靠的数据转发服务，向着多类型、多层次混合组网的方向发展等问题。星上高效转发是重要使能技术之一。因此，针对未来天地融合的组网互联与信息传输需求，需研究空、天、地全时全域立体覆盖，微波、激光异构星间链路混合组网场景下，多体制数据传输与多模态交换需求与特征，研究星上光交换、数字交换、微波光子信道化交换等高速数据转发与交换技术，实现星上体积重量功耗约束下的高效数据转发与交换。

星上光交换：卫星载荷平台空间资源紧张，因此对具备小型化、低功耗和轻量化的光交换矩阵模块有迫切需求。同时，大颗粒度业务的星间激光链路复合传输，需要结合波分复用技术与基于波长变换的光交换技术。星上应用环境复杂，要求光交换矩阵模块的不同信道间需要有较高的信号隔离度来保障信号质量和实现高吞吐量无损数据交换。此外，光交换矩阵模块需要具备无阻塞全交换的特征以实现信道灵活配置和业务灵活部署。

数字交换：天基光交换需要对用户业务分组进行存储与转发，对全光交换板卡发送的光信号进行解调，因此需要数字交换技术对解调得到全光交换数据帧根据星上特定转发表将其进行分组交换，最后将分组数据调制为光信号发送给全光交换板卡。数字交换需要实现业务适配、全光交换虚通道（VC）交叉、标签转发信息表、流量调度、内部缓存、自动保护倒换等功能。同时数字交换需支持小颗粒度的分组业务传输，与全光交换相结合实现业务的汇聚与分流，统一承载转发，以适应更多的信道类型接入、多粒度业务的混合交换。

微波光子信道化交换：针对星上用户的不同需求，需实现多路频带任意交换，并能使单路频带变得灵活可调谐，因此需要微波光子信道化交换技术，该技术可实现低复杂度、大容量的星载交换，通过信道分配、信道切割和信号重构等方式实现多路不同带宽窄带信号的综合与重构，从而可完成微波光子信道化交换的整个过程。微波光子信道化交换过程需要通过交换光载波而不是有效载荷信号来实现，在不降低信号功率的前提下，保证信噪比，并且要求由各自独立的小型模块构成，模块小型化可集成，以任意波长选择为核心，实现可扩展，多通道的微波光子交换。

3.3.3. 生存性保障技术

由于天地一体化网络处在太空环境、大气环境和地面环境的包围中，导致其极易受太空环境、大气环境和地面环境的影响，严重影响其可靠稳定运行。地面环境中的地震、施工、洪水、强降雨、台风、山体滑坡、泥石流、山火、龙卷风、冰雹、山洪、暴雪等情况会损毁通信设备和光纤链路。大气环境中大气湍流、云层遮挡、雨衰、雪衰等情况会影响通信传输质量，严重时会导致星地间通信链路中断。太空环境中的卫星蚀、日凌、等离子体、太阳活动、流星体和空间碎片、地磁场等情况会导致卫星故障甚至失效或者导致星地

和星间链路中断。如何从网络设计之初对天地一体化网络进行准确的可靠性评估，减少故障的发生或者降低故障发生的概率成为保障天地一体化网络可靠性的首要任务。另外，对于具有庞大规模的天地一体化网络来说，故障是不可能避免的，因此迫切需要天地一体化网络在故障情况下能够继续提供可靠的服务。

天地一体化网络可靠性评估：相对于地面网络固定的节点链路连接关系，卫星网络中卫星节点的位置以及卫星节点间的相对距离都是以时间为变量的函数，网络的拓扑关系呈周期变化。需要针对太空环境、大气环境和地面环境中的每种因素造成的空地融合网络性能下降或者故障进行定量指标描述，建立环境因素与空地融合网络可靠性的数学联系，形成空地融合网络的可靠性评估指标体系。同时，需要建立太空环境、大气环境和地面环境的影响导致的天地一体化网络状态转移关系，建立统一的天地一体化网络的状态转移关系，计算状态之间的转移概率，形成天地一体化网络的可靠性评估模型。

立体化抗毁方案：对于天地一体化网络来说，卫星网络处在太空环境中，星地链路处在大气环境中，地面网络处在地面环境中，卫星网络和地面网络具有灾难独立性，卫星网络与地面网络可以协同以实现立体化抗毁组网。由于卫星激光链路的容量小于光纤链路的容量、激光链路的性能低于光纤链路、空间激光链路的成本也高于地面光纤链路的成本，因此需要构建立体化抗毁策略，在抗毁能力、成本、网络性能、传输质量等方面进行综合权衡，保证在提升网络抗毁能力的同时具有可接受的成本、网络性能和传输质量。

智能体构建与保障方法：天地一体化网络受太空环境、大气环境、地面环境多重环境的影响，器件老化、气压、温湿度变化等导致的传输性能的下降难以预测，极端环境导致的突发多故障定位准确率低，无法实现实时自适应的网络调整，使得天地一体化网络的传输质量和系统性能难以保障，影响天地一体化网络的承载能力和服务质量。智能体构建与保障方法利用人工智能技术实现最优的体覆盖，并进行空间环境和大气环境的感知，实现体上光信号传输质量的精确预测，实现调制格式等的自适应调整，保障体结构的稳定性。

3.3.4. 数字孪生技术

天地一体化的光通信系统中，规模性的网络故障带来的业务中断将给互联网应用带来巨大损失，这对光网络的稳定性和可靠性提出了极高的要求。为了增强对复杂光网络的感知、监控、优化的能力，并最大化利用网络资源以提升网络容量，智慧光网络的构建迫在眉睫，基于知识与数据联合驱动的物理层数字孪生系统将成为关键数字底座。数字孪生技术以数字化的方式建立物理实体的多维度、多学科、多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的状态、行为、规则等。作为一种充分利用数据、模型、算法并集成多学科的技术，数字孪生为物理世界与数字世界的全面联系建立了桥梁和纽带，为实现二者之间的交互与融合提供了有效的解决途径。与传统光网络物理层的静态建模不同，数字孪生技术将基于感知单元采集的实时数据，对每一个物理器件和传输链路进行数字化同步映射，为网络管控提供实时精准的物理层关键信息和动态映射模型，基于该数字底座可以进行全生命周期的监测、模拟、推演、分析和自动优化等一系列功能。面向天地一体化光通信的数字孪生系统是突破泛在感知、动态建模和自动优化方面的关键技术。

网络状态泛在感知：首先是“数据”部分，数字孪生必须以海量数据为基础，并且是基于全要素、全生命周期的数据，只有通过物理空间中采集到的数据，才能够在数字空间中建立数值化模型，并且驱动其运行。光网络从物理层到网络层通过传感探测、性能监测、网络上报等可采集到来源广泛、类别多样的海量数据，包括历史数据、初始数据、实时更新数据和其他关联数据等。然而，不同数据具有不同的结构特点、运行方式、存储机制和处理算法。因此，需要对多源异构数据进行融合处理，数据融合处理技术包括对各种数据源给出的有用信息的综合、过滤、合成及分析，以保证数据的统一、规范和通用。

高保真镜像建模：“镜像模型”是数字孪生系统的核心，其通过数值化的方式在物理世界和数字世界之间全面建立准实时联系，数字孪生利用建模技术对光网络的物理状态、运行过程、变化趋势等进行数字化描述、模拟和分析，因此，可以说孪生模型是数字孪生的灵魂。为了实现开放解耦光网络健康、稳定、高效运行，需要对光器件和光传输系统进行多维协同建模。数据驱动的灰盒孪生模型可以解决传统模型（白盒）的精度问题和机器学习模型（黑盒）的泛化性问题。灰盒孪生模型针对光纤链路的特性，对光纤、光放大器、波长选择开关和光收发机等关键模块分别建模。各模块基于特有的物理特性建立的传统模

型和机器学习模型相融合，从而实现各个模型的高精度和高泛化性。其次，为了满足网络管控速度的要求，需要降低模型的复杂度。各模块之间的耦合需要进一步结合波形仿真模型和性能计算模型，达到复杂度和精度的最优折中。同时，针对各模块之间的相关性，需要建立端到端的联合校准机制，提升系统整体的建模精度。最终在数字空间中，根据不同场景需求，利用数据和知识混合驱动的思想建立快速、有效的传输过程中时域和频域的动态响应模型。

网络性能自动优化：“优化策略”是利用数字孪生技术实现网络性能优化、保障系统稳定运行的功能应用部分。在动态光传输过程中，信号的时域波形和功率谱分布会出现恶化及波动。然而，现有的实际系统往往缺乏实时精准优化的能力，配置策略严重依赖专家经验及初始状态，不够智能。因此，数字孪生系统要求基于建立的孪生模型，在数字空间通过数值模拟智能化地制定精准、匹配的优化策略，并反馈至物理空间，对光传输系统进行优化配置。基于所建立的时域和频域的动态响应模型，实现孪生模型辅助的光传输系统中光域和电域的协同优化算法。同时，优化策略建立在镜像模型实时更新的基础上，在线学习可基于迁移学习算法，对模型进行动态实时更新，校准模型的不准确性和参数的不准确性。此外，在时间维度上，可以利用时间序列分析技术研究光物理层器件变化规律，构建预测未来系统性能的推演能力。最终，优化策略以实时更新的镜像模型为基础，可以在控制系统中智能化制定匹配精准的反馈策略，对光传输系统实施低成本、高效率、智能化的优化配置，从而发挥空天地一体化光网络的效能。

3.4. 感知技术

3.4.1. 通信感知一体化

天地一体化网络中，感知、通信设备的大规模部署会引入大量的器件和频谱资源开销。为了实现高效、智简光网络，并最大化利用硬件和频谱资源，推动通信感知一体化技术是关键一环。通过通信与感知的硬件、频谱、信号处理和节点共享，一体化网络可以进一步提高覆盖能力、传输效率、安全性和智能化水平。面向天地一体化光通信的通信感知一体化需突破多模态信息光感知、面向多模态信息的光传输和通感一体化系统设计关键技术。

多模态信息光感知技术：指利用光学技术来实现对多种信息如图像、深度、光谱、偏振等的感知和处理。多模态信息光感知技术可以提高感知信息的质量和维度，增强对场景的理解和表达，为云业务、全息通信、智慧交互、遥感等领域提供新的解决方案。面向高效、快速的多模态信息感知方法需求，研究新型信息采集理论，设计基于单个或多个传感器的混合感知方式，实现快速、高质量多模态信息光感知。面向对多种信息的准确重构需求，研究数据驱动方法，设计基于深度学习的网络模型，实现高质量、快速、多维的信息重建。

面向多模态信息的光传输：指利用激光作为信息载体，通过空间或光纤进行多模态信息的高速率、高安全、低延迟数据传输。面向高效多模态信息传输需求，设计高性能、低复杂度、可扩展通信感知一体化编码调制及信号处理方法，提出基于自适应或机器学习的信道损伤补偿算法，提高光传输系统业务的传输容量及传输距离。

通感一体化系统设计：通过共享硬件、频谱、信号或节点，设计同时具备多模态信息光感知及传输功能的一体化系统，降低一体化光网络的成本、功耗。根据通信和感知对于硬件的共性需求，设计合理可靠的硬件架构和布局，实现感知与通信的功能复用。根据不同应用场景的性能需求，综合频谱效率、传输距离、感知分辨率等指标进行分析，设计适用于通信和感知的系统架构。

3.4.2. 网络化智能感知

天地一体化网络将实现全球范围内的无缝通信覆盖，融合卫星和地面网络，为用户提供高速智能的服务。而随着通信频段的持续提升和网络规模的不断扩大，F6G在智能感知、网络协同管控等领域正面临巨大挑战，亟需构建起广覆盖、高动态的信息采集与融合架构，基于全网共享的感知信息，在系统层面获得更高的安全保障和更智能的管控决策。智能感知技术可以实时收集网络性能数据，检测异常并提供预警，从而减少网络中断时间，提高服务可靠性。面向天地一体化光通信的网络化智能需要突破全域全谱感知和决策管控关键技术。

全域全谱感知技术：全域全谱感知技术是一种对物理世界进行全方位、全维度、全频谱的感知和理解的技术。通过高精多维传感设备对目标区域进行多维度、多频谱的数据

采集，并进行数据校准、编码等操作，提高数据质量和传输效率。利用多任务学习、迁移学习、强化学习等技术，对不同模态、不同频谱的数据进行融合和分析，提取数据中的关键特征和关联信息，实现对目标区域的精细识别和理解。另外，为了满足未来业务的低时延要求，需要研究低复杂度一体化感知技术，提供低成本高可靠的技术方案。

智能协同决策管控：传统的人工或简单算法驱动的网络管控机制难以应对复杂化的网络业务需求。然而，感知信息的数据融合、智能分析决策和协同管控将成为满足不同通信场景需求的关键。在这一背景下，人工智能技术将发挥重要作用，为未来网络的分布式智能感知和协同管控提供支持，从而实现全局管控网络状况的目标。这一技术路线的核心包括高性能深度学习模型、高效数据采集与传输、智能安全性保障等方面的研究。同时，要实现智能协同管控的全面部署，需要降低大规模系统的复杂性，确保数据隐私和安全性，满足高可用性要求。

3.5. 呈现技术

3.5.1. 内容采集与处理

三维全息通信技术能够为用户提供更真实、更具临场感的使用体验。天地一体化光网络可提供高速、高带宽、低延时的数据传输，适应三维全息通信传输数据量大、实时性要求高的特点。三维全息通信首先需要进行内容采集和实时高效的内容处理，然后通过三维渲染技术呈现在裸眼 3D 显示器上，给人以身临其境的视觉体验。三维全息呈现所需的动态三维内容又称作“体积视频”（Volumetric Video），其采集方式可以分为纯彩色相机阵列（RGB）采集和深度相机+彩色相机阵列（RGBD）采集。纯彩色相机阵列采集用几十甚至上百个彩色相机从多个角度捕捉人像和表演，为了后期方便数据提取，通常会在周围布置绿幕。拍摄时，通过时间控制器控制相机阵列同步启动拍摄。根据应用场景等不同，彩色相机阵列又可分为局部围绕式和 360°围绕式。相较于纯彩色相机阵列，目前主流的做法是通过深度相机搭载彩色相机阵列来完成。和单纯用彩色相机相比，加上深度相机后，生成的人物三维数据更加精细，细节表现会更好。例如脸部的三维效果更明显，可以清晰看到鼻梁的高度、嘴唇的轮廓等细节。针对 RGB 阵列和 RGBD 阵列两种采集方式，三维重建算法可分为两大类：纯彩色相机阵列的被动式和深度相机加彩色相机的主动式。

被动式三维重建算法：直接根据 2D 图片信息，而不依靠发射信号，对物体进行重建。被动式三维重建算法需要通过精准的视差计算和立体匹配来恢复三维信息，是计算密集型任务，对存在遮挡和阴影的区域重建难度较大。被动式三维重建算法，如 SfM（Structure from Motion），主要是通过还原点云进行三维重建。SfM 是一种全自动相机标定离线算法，以一系列无序的图像集作为输入，估计出的相机参数矩阵和稀疏点云为输出。由于 SfM 算法得到的点云是稀疏的，因此需要再进行 MVS（Multi View Stereo）算法对稀疏点云进行处理，转换为稠密点云。

主动式三维重建算法：需要通过传感器对物体发射信号，然后解析返回的信号对物体进行重建。主动式三维重建算法需要高性能的捕捉设备来获取精准的距离信息，深度数据的噪声和错误会影响三维重建的结果。具有代表性的主动式三维重建算法有：结构光、TOF 等。其中，以红外光结构光为例，依靠红外投射器将编码的红外光投射到被拍摄物体上，然后由红外相机进行拍摄，获取被拍摄物体上编码红外光的变化，将其转换为深度信息，进而获取物体三维轮廓；TOF 法通过投射器向目标连续发送光脉冲，然后依据传感器接收到返回光的时间或相位差来计算距离目标的距离。主动式算法如结构光法和 TOF 法能够精准构建 3D 模型，但二者都需要较为精密的传感器。

3.5.2. 三维渲染与呈现

采集设备获取的大规模图像数据，通过天地一体化网络的高效传输，保证了接收数据的高质量和低时延，为后续的内容处理和渲染呈现效果奠定了基础。图像数据经过算法进行内容处理后，生成的数据模型使用渲染技术在显示设备上展示。渲染方法主要有多视图立体渲染技术和多平面图像技术。多视图立体渲染技术主要用于虚拟现实（VR）设备的图像渲染。当图像通过虚拟现实眼镜等设备呈现在人眼前，设备呈现的画面质量直接决定用户的观看感受。在该类设备上，图形硬件厂商在提升画面视野，降低图形畸变，提高图形质量等方面不断努力，并推出一系列技术与解决方案。多平面图像渲染技术是一种基于图像渲染环境复杂真实场景的技术。例如在渲染具有遮挡或镜面反射等具有挑战性的复杂场景时，这种技术比传统的 3D 网格渲染更有效。多平面图像（Multi-Plane Image, MPI）能够表示几何体和纹理（包括遮挡元素），并且使用 alpha 通道处理部分反射或透明对象以

及处理柔软边界。增加平面数可以使 MPI 表示更宽的深度范围，并允许更大程度的相机移动。此外，由 MPI 渲染生成新视点非常高效，并且可以支持实时应用程序。未来主流的裸眼全息屏技术有基于空间中三维物体光场重构的体三维技术和光场立体显示技术。

体三维显示：一种全新的三维图像显示技术，通过适当方式激励点亮位于显示空间内的物质，利用可见辐射的产生、吸收或散射形成大量的体像素，从而构建出三维图像。然而，现有可应用的体三维显示技术大多通过震动、旋转等方式形成屏幕，其高加速度的机械控制部件承受应力极大，容易出现安全事故，因此其需要强度极大的保护罩。体三维显示技术呈现的图像就像是一个真实的三维物体，符合人类观察的普通三维图像的特点，几乎能满足所有生理和心理的深度暗示，可实现多人、多角度的同时裸眼观察。

光场三维显示技术：利用带有方向的光束来构建空间三维物体的光场。空间中任意一个三维物体都可以看作是由无数个发光点组成，任意一个点能够主动或者被动地向空间中各个方向发出携带自身特性的光线。通过设计控光单元的结构、对 2D 显示设备上加载图像进行有规律的编码等方式，调制有控光单元出射的携带三维场景信息的方向光，使其能够在空间中汇聚并构建出向不同方向投射不同空间信息的体像素。然而，单层控光元件构成的控光单元难以有效消除成像像差，需要对控光元件进行多层堆叠以控制成像像差，降低呈现体像素间的串扰。用这些体像素来模拟真实物体的发光点，使人眼获得更真实、自然的 3D 影像。

4. F6G 适用场景与应用

4.1. 全时域光互联

随着万物互联时代的到来，信息通信网络正在沿着时间和空间不断拓展，“全时可用、全域覆盖”的万物互联体系将成为未来国际竞争力的核心要素。如图 9，全时全域光互联是未来 F6G 的核心应用场景，是实现万物互联的承载基座；其以地面网络、空基网络和天基网络（地空天）作为设施载体，以光作为传输媒质实现各层相互连通与协作。全时全域光互联属于异构资源协同组网，主要具备“大尺度、高速率、多波段”三大关键特征。

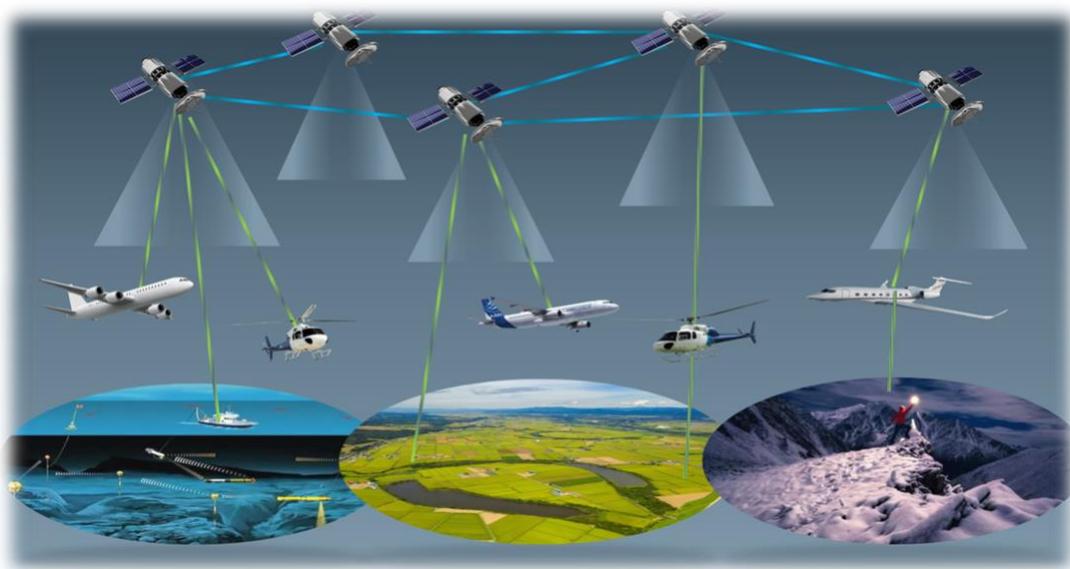


图 9 面向地空天的全时全域光互联

(1) 大尺度。具体指跨越较大范围的时空尺度。全时全域光互联将传统通信由地面延伸至空间，F6G 将提供高动态网络容量优化和多源异构数据融合应用等核心技术，以提升全球范围、全天时的信息通信能力，满足更大容量、更高速度、更低时延的业务需求，为国防军事、国民经济和社会服务提供基础通信保障。

(2) 高速率。万物互联体系需要超 100Gbit/s 的高速率空间光互联技术来支撑。在 F6G 中，通过宽光谱范围的空间硅基光子芯片、高速光信息处理器件和多粒度交换器件等，减小系统尺寸与功耗，削弱大气湍流影响，抵抗强电磁流与射线辐照，提高调制效率和响应速度。

(3) 多波段。不同频段资源在覆盖范围、传输容量和协同处理等方面性能参差不齐，全时全域光互联将克服通信频谱和轨道等资源的严重制约，通过光波多波段可调谐光发射与接收机、宽范围调谐和高精度控制的激光器，实现多源异构光电融合通信中的实时数据采集、处理、传输过程。

4.2. 全息通信

天地一体化 F6G 网络基于支撑大尺度空间的全时全域互联能力，配合裸眼三维显示技术真实度高、参与感强和沉浸感佳的优势，未来可支撑各类全息通信应用，如图 10。



图 10 F6G 全息通信应用示意图

(1) 一对多全息通信：全息演讲或教学

当前，远程演讲或教学逐渐应用于现实生活，信息的传播不受地域限制。相较于传统的通信方式，全息高真实性的特点使受众专注度大为提升，学习效果进一步贴近线下教学。

此应用场景具有如下特点：信息流重要程度通常不对等，下行流重要性（演讲者或授课者的信息）大于上行流（受众的反馈），信息流呈现辐射状。基于以上特点，初期的业务端到端解决方案可采用单向（下行）全息显示，上行高清显示，这有利于在全息技术和 F6G 等高速网络技术的发展初期进行部署。

(2) 多对多全息通信：会议

当全息技术和大带宽网络技术发展到一定阶段，可以构筑高质量高感官程度的互动通讯。在视频会议这一场景中，线上参会人员人物数据将会被实时采集并通过全息显示技术，在人员身边构建虚拟的高真实度参会场景，实现身临其境般的线上会议讨论。

此应用场景具有如下特点：信息流重要程度对等，每个人的面前都需要显示所有其他人的全息影像和声音，是一对一的复杂形式。基于以上特点，业务端到端解决方案中每个用户既是被采集者也是接受者，作为接受者时，同时获取来自其他用户的全息影像和声音。此模式对网络带宽的需求很高。



图 11 F6G 虚实交互应用示意图

4.3. 虚实交互

虚拟现实是新一代信息技术的重要前沿方向，是数字经济的重大前瞻领域，将深刻改变人类的生产生活方式。它涵盖近眼显示、渲染处理、感知交互、网络传输、内容生产、压缩编码、安全可信等核心关键技术，以先进的云、网、边、端、芯组成硬件的基础底座。在虚实交互方面，F6G 具有广阔的应用前景，可提供高速、稳定、低延迟的数据传输和通信支持，实现更加流畅、更加真实的虚拟现实和增强现实应用，如虚拟会议、虚拟旅游、虚拟现实游戏等。用户可以在元宇宙的虚拟多人互动环境中创建和控制自己的虚拟角色，

与其他用户进行互动、交流和游戏。除了元宇宙，F6G 还可以应用于 XR（增强现实）等领域。例如，在现实场景中，用户可以通过佩戴智能眼镜或其他设备，实时感知周围环境，并将虚拟信息叠加在现实场景中，从而实现对现实世界的增强感知，如图 11。

目前，已有许多现实世界场景被迁移至虚拟世界中，通过光通信技术的支持，这种虚实交互可以实现“超高速率、超低时延、超大连接”的数据传输和通信，从而实现虚拟世界与现实社会的高度同步。同时，虚实交互在未来的广泛应用将会对光通信技术提出进一步的需求，未来光通信技术的进一步发展也会促进虚实交互体验的不断提升。

(1) 带宽需求推动光通信发展：虚实交互技术对数据传输的需求巨大，需要传输大量的高清图像、视频和传感器数据。天地一体化光通信作为一种高带宽传输技术，能够满足虚实交互对数据的高速传输需求。虚实交互的发展将进一步推动光通信技术的发展，充分利用天地一体化网络的覆盖优势，打造全时全域虚实交互应用。

(2) 延迟保障实时交互体验：虚实交互技术对实时性的要求非常高，需要实时响应用户的动作和操作，以提供流畅的交互体验。光通信具有高速传输和低延迟的特点，可以有效地支持实时的数据传输，确保虚实交互系统的快速响应和实时性。天地一体化光通信将基于天地双网的宽带传输能力，为虚实交互应用提供低延迟的数据传输能力。

(3) 抗干扰性保证稳定交互环境：虚实交互技术通常在多人同时参与的环境中进行，如多人游戏、虚拟会议等。在这种情况下，通信系统需要具备高抗干扰性，以确保数据传输的稳定性和可靠性。天地一体化光通信技术将具备自组织抗毁能力和更强的抗干扰性，能够提供更稳定的传输环境，为虚实交互提供可靠的数据传输基础。

4.4. 智能体互联

随着人工智能技术的迅猛发展，智能系统将广泛应用于人类生产与生活的各个空间，人能否与智能系统形成良好的交互及协作关系，将影响着能否最大化发挥智能系统的能力。智能系统所具备的自主学习、自主决策、主动交互、情境感知等能力与特性，正推动着传统的“刺激-反应”式的人机关系向着人机融合发展，即伙伴式的“人机智能协作”关系。以机器为代表的“智能体”未来将与人类充分协作，且具备高速移动、高度智能的特征。为了承担更多人类无法完成的任务，智能体将广泛存在于陆地、海洋、天空，甚至太空。

支撑大尺度空间的“人-机”与“机-机”等智能体的高效协同，将是天地一体化光通信系统的关键应用之一，如图 12。

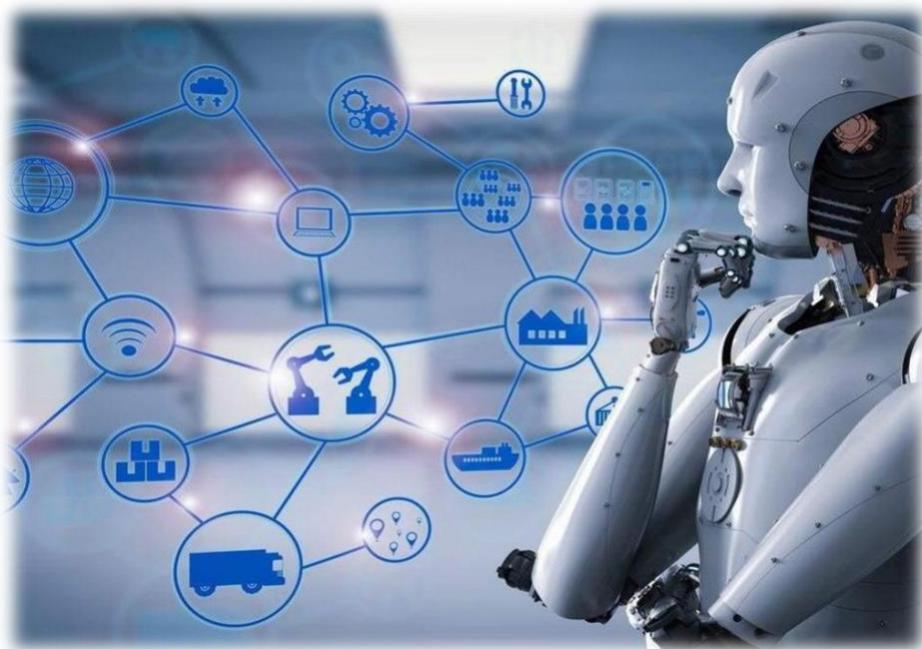


图 12 F6G 智能体互联应用示意图

为了满足智能体互联的信息交互需求，F6G 网络可通过天地一张网实现海陆空无缝覆盖与万物互联。在 F6G 支持下，可接入的人、物和设备数量和规模将进一步提升，即无论是有人区还是无人区，都能实现智能机器覆盖，以延长人类活动所能触及的范围。被连接的人、物、设备可能升级为可相互连接的“数字物种”，其产生的海量数据源源不断地汇入到智能中枢，再将智能中枢产生的智慧带到每一个场景，形成全时全域的智慧协同。

附：主要贡献单位与人员（排名不分前后）

北京邮电大学： 黄善国、赵永利、王 伟、杨 辉、王丹石、于振明、张佳玮、
郭秉礼、于迅博、李亚杰、郁小松、李 岩、徐兴元、欧燕妮、
李新，薛旭伟

清华大学： 郑小平、华 楠

北京大学： 陈章渊、张 帆

北京理工大学： 董 毅、谢玮霖

上海交通大学： 胡卫生、诸葛群碧

复旦大学： 迟 楠、张俊文

华中科技大学： 唐 明

中山大学： 李朝晖，李凡

电子科技大学： 江 宁

西南交通大学： 闫连山

苏州大学： 沈纲祥、李泳成、高明义

重庆邮电大学： 郭 磊、侯维刚

广东工业大学： 付松年

南方科技大学： 沈 平

西安电子科技大学： 顾华玺