

空天地一体化 通信系统

WHITE PAPER V7.0 H
2020.11

空天地一体化通信系统

编制单位：紫光展锐（上海）科技有限公司、中山大学、中兴通讯股份有限公司、中国空间技术研究院、北京邮电大学、北京小米移动软件有限公司、天津大学、中国移动通信有限公司、中国电信集团有限公司、中国联合网络通信有限公司、大唐移动通信设备有限公司、成都天锐星通科技有限公司、东南大学、西安空间无线电技术研究所、电子科技大学、三星通信研究院、北京中科晶上科技股份有限公司、北京信息科技大学、现代测控技术教育部重点实验室

2020年11月27日

摘要

在过往的数十年中，由于技术和市场等因素，地面蜂窝通信系统和卫星通信系统各自独立发展，都取得了辉煌的业绩，促进了人类社会的巨大进步。在 5G 时代，通过网关连接，卫星通信与地面通信实现了业务层面的互联互通，相互补充。但是，面向未来广域万物智联与全球随遇接入等迫切需求，地面蜂窝通信系统和卫星通信系统继续独立发展都将面临极大挑战。在新兴技术快速发展的驱动下，构建空间网络与地面网络相融合的空天地一体化通信系统，实现统一高效的资源调度与网络管控，已成为未来通信网络的发展趋势。

本白皮书主要从这四个角度阐述了对空天地一体化通信系统的思考，包括发展驱动与愿景、需求与挑战、立体融合网络架构以及潜在的关键技术。首先分析了推动空天地一体化通信系统发展的双重驱动力，并描绘了未来的愿景，提出空天地一体化通信系统的两大核心要素和三大典型特征，然后梳理了网络能力需求和面临的挑战，最后探讨了空天地一体化通信系统的网络架构和未来潜在的关键技术。

1. 发展驱动

空天地一体化通信系统发展受到业务需求和技术发展的双重驱动。业务需求主要体现在广域万物智联和全球随遇接入两方面。卫星技术和运载技术的创新发展为未来建设大规模卫星网络提供了有力支撑。AI 技术与通信将会更加深度融合，解决复杂的异构通信系统问题。区块链作为一种极具潜力的安全技术，为开放融合、异构共存的空天地一体化通信系统中的数据传输安全问题提供了解决途径。

2. 发展愿景

空天地一体化通信系统是 6G 的一种典型体系架构，其愿景是满足十年后的广域智慧连接和全球泛在无缝接入需求，为广域的对象建立智能连接，提供智慧服务，为人类提供全球无间断且一致性的信息服务。空天地一体化通信系统具有三大典型特征：统一的空口技术、统一的网络架构和统一的智能管控。

3. 网络能力需求

相对于传统卫星通信系统，空天地一体化通信系统需要具备更全面的能力，不仅需要传统的通信能力，还需要计算能力、AI 能力和安全能力。其中，通信能

力是未来 6G 空天地一体化通信系统发展的基本需求，AI 能力则是空天地一体化通信系统的核心能力，包括感知、学习、推理、预测和决策五大能力。

4. 面临的挑战

空天地一体化通信系统具有网络异质异构、空间节点高度动态、拓扑结构时变、极大的时空尺度、空间节点资源受限、卫星广播传输链路易受攻击等特点，这些特点对网络架构、星地融合通信制式、星间组网协议等方面的设计提出了更高的要求。

5. 立体融合网络架构

未来的空天地一体化通信网络，是以地面网络为依托、以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。网络总体架构包含物理架构、逻辑架构、实现架构三层含义。在实现架构上，借鉴微服务思想，空天地一体化通信网络采用资源虚拟化技术，实现接入网、承载网和核心网的星地一体虚拟化。

6. 关键技术方向

本白皮书从五个方向探讨了空天地一体化通信系统的关键技术。

（1）无线传输技术

在空天地一体化通信系统中，必须发展新型的载波调制技术，以对抗卫星载荷中大功率射频器件的非线性特性以及星地链路传输的非理想特性。相比较而言，SCMA 和 MUSA 将是适用于空天地一体化系统的潜在多址技术。大规模星座卫星的部署模式将为应用 MIMO 技术提供基础，通过星间协作，建立虚拟多天线系统，实现多星多波束协作传输。

（2）网络技术

空天地一体化通信系统组网协议的发展趋势是借鉴地面成熟的 TCP/IP 互联网协议体系，将 DTN 和 CCSDS 等各协议体系逐渐统一到 TCP/IP 为核心的组网体系中 (IP over X)。认知干扰协调技术和动态频谱共享技术是解决空天地一体化通信系统中频率资源稀缺与低利用率矛盾的有效手段。实现空天地端到端一体化网络切片需在网络拓扑结构预测、人工智能 SLA 保障、接入网和核心网一体虚拟化等方面展开研究。

（3）新型星上载荷技术

面对未来空天地通信高度一体化的挑战，星载多波束天线技术在未来通信卫星系统中将与系统工作模式紧密联系在一起，不再是“独立”的天线分系统。智能化卫星载荷将以软件定义的计算能力和重构能力为基础，结合 AI 技术，完成频谱认知和网络认知，进行业务预测和资源分配，使载荷具备自主应对业务和流量变化的能力。未来，星上容错设计应采取功能模块高效容错与系统级故障恢复相结合的技术路线。

（4）智能化融合化终端

泛在化和智能化是空天地一体化终端的关键特征。适应终端芯片异构计算能力的开源深度学习框架和轻量化的边缘人工智能算法是终端智能化的基础。低成本的平板相控阵天线作为终端核心部件，对空天地一体化通信系统能否成功商业应用有直接影响。终端相控阵天线的成本与芯片工艺技术密切相关。

（5）业务与应用技术

空天地一体化通信系统中存在大量多方协作的场景。未来的多方协作服务与资源共享将朝着去中心化、智能化的方向发展。目前存在通导系统分立、融合程度低的问题，通过低轨通信星座载荷搭载、通导一体化设计、建设低轨导航增强专用星座等手段，可实现精密单点定位、安全定位授时、天基监测、抗干扰定位等功能。

Executive Summary

In the past decades, due to factors such as technology and market, ground cellular communication system and satellite communication system have developed independently, and have made brilliant achievements, which has promoted the great progress of human society. In the 5g era, through the gateway connection, the satellite communication and the ground communication realize the interconnection and intercommunication at the business level and complement each other.

However, in the face of the urgent needs of future wide area intelligent connection and global random access, the continuous independent development of terrestrial cellular communication system and satellite communication system will face great challenges. Driven by the rapid development of emerging technologies, building a comprehensive space-air-ground integrated communication system integrating space networks and terrestrial networks to achieve unified and efficient resource scheduling and network management and control has become the development trend of future communications networks.

This white paper mainly elaborates our thinking on space-air-ground integrated communication system from these four perspectives, including development drive and the vision, demand and challenges, three-dimensional integration network architecture and potential key technologies. Firstly, this paper analyzes the dual driving forces to promote the development of space-air-ground integrated communication system, and describes the future vision. It puts forward two core elements and three typical characteristics of space-air-ground integrated communication system. Then it combs the network capability requirements and challenges faced. Finally, it discusses the network architecture and potential key technologies of space-air-ground integrated communication system.

1. The dual driving forces

The development of integrated air-space-ground communication systems is driven by both business needs and technological development. Business needs are mainly reflected in two aspects: wide-area intelligent connection of all things and global

ubiquitous seamless access. The innovative development of satellite technology and delivery technology provides strong support for the construction of large-scale satellite networks in the future. AI technology and communication will be more deeply integrated to solve complex heterogeneous communication system problems. Block-chain, as a highly potential security technology, provides a solution to the data transmission security problem in an open, integrated, heterogeneous air-space-ground integrated communication system.

2. The vision

The air-space-ground integrated communication system is a typical 6G architecture. Its vision is to meet the needs of wide-area smart connections and global ubiquitous seamless access ten years later, establish smart connections and provide smart services for wide-area objects. Provide mankind with global uninterrupted and consistent information services. The air-space-ground integrated communication system has three typical characteristics: unified air interface technology, unified network architecture, and unified intelligent management and control.

3. Capability requirements

Compared with traditional satellite communication systems, air-space-ground integrated communication systems need to have more comprehensive capabilities, not only traditional communication capabilities, but also computing capabilities, AI capabilities, and security capabilities. Among them, communication capabilities are the basic requirements for the future development of 6G air-space-ground integrated communication systems, and AI capabilities are the core capabilities of air-space-ground integrated communication systems, including five abilities of perception, learning, reasoning, prediction and decision-making.

4. The challenges

The air-space-ground integrated communication system has the characteristics of heterogeneous network, highly dynamic space nodes, time-varying topological structure, extremely large time and space scale, limited space node resources, and vulnerability of satellite broadcast transmission links. The design of the architecture, satellite-to-ground integrated communication system, and inter-satellite networking

protocols put forward higher requirements.

5. Network Architecture

The future air-space-ground integrated communication network is a three-dimensional hierarchical network based on the ground network and expanded by the space-based network. Each constellation satellite, adjacent space platform and ground node jointly form multiple coverage. The overall network architecture includes three meanings: physical architecture, logical architecture, and implementation architecture. In terms of the implementation architecture, drawing on the idea of micro-services, the air-space-ground integrated communication network adopts resource virtualization technology to realize the satellite-ground integrated virtualization of the access network, the bearer network and the core network.

6. Key Technologies

This white paper discusses the key technologies of the air-space-ground integrated communication system from five directions.

(1) Wireless transmission technologies

In the air-space-ground integrated communication system, a new type of carrier modulation technology must be developed to counter the nonlinear characteristics of high-power radio frequency devices in the satellite payload and the non-ideal characteristics of satellite-to-ground link transmission. In comparison, SCMA and MUSA will be potential multiple access technologies suitable for integrated air-space-ground systems. The deployment mode of large-scale constellation satellites will provide the basis for the application of MIMO technology. Through inter-satellite cooperation, a virtual multi-antenna system can be established to realize multi-satellite multi-beam cooperative transmission.

(2) Network technologies

The development trend of the networking protocol of the air-space-ground integrated communication system is to learn from the mature TCP/IP Internet protocol system on the ground, and gradually unify the various protocol systems such as DTN and CCSDS into the TCP/IP-core networking system (IP over X). Cognitive interference coordination technology and dynamic spectrum sharing technology are

effective means to solve the contradiction between the frequency resource gap and low utilization in the air-space-ground integrated communication system. Realizing the end-to-end integrated air-space-ground network slicing requires research in the areas of network topology prediction, artificial intelligence SLA guarantee, and integrated virtualization of the access network and core network.

(3) New satellite payload technology

Faced with the challenge of highly integrated space, air and ground communications in the future, space-borne multi-beam antenna technology will be closely linked to the system working mode in future communication satellite systems, and will no longer be an "independent" antenna sub-system. The intelligent satellite load will be based on the computing power and reconstruction ability of the software-defined load, combined with AI technology, complete spectrum cognition and network cognition, perform business prediction and resource allocation, so that the load has the ability to independently respond to business and traffic. In the future, on-board fault-tolerant design should adopt a technical route that combines high-efficiency fault tolerance of functional modules with system-level fault recovery.

(4) Converged terminals

Ubiquity and intelligence are the key features of the air-space-ground integrated terminal. The open source deep learning framework that adapts to the heterogeneous computing capabilities of terminal chips and lightweight edge artificial intelligence algorithms are the basis for terminal intelligence. As the core component of the terminal, the low-cost flat-panel phased array antenna has a direct impact on the successful commercial application of the air-space-ground integrated communication system. The cost of the terminal phased array antenna is closely related to the chip process technology.

(5) Application Technologies

There are a lot of multi-party collaboration scenarios in the air-space-ground integrated communication system. In the future, multi-party collaborative services and resource sharing will develop in the direction of decentralization and intelligence. At present, there are problems of separation and insufficient degree of integration of

communication and navigation systems. By means of low-orbit communication constellation load carrying, integrated communication and navigation design, and construction of low-orbit navigation enhanced special constellations, precise single-point positioning, safe positioning and timing, and anti-interference can be achieved Positioning and other functions.

目 录

1.	前言	1
2.	发展驱动与愿景	3
2.1.	驱动力	3
2.2.	发展愿景	4
3.	需求与挑战	6
3.1.	网络能力需求	6
3.2.	面临的挑战	6
4.	立体融合网络架构	9
4.1.	网络总体架构	9
4.2.	MSB 接入网架构	10
4.3.	分布式核心网架构	11
5.	关键技术方向	15
5.1.	无线传输技术	15
5.2.	网络技术	24
5.3.	新型星上载荷技术	34
5.4.	智能化融合化终端	39
5.5.	业务与应用技术	43
6.	总结	51

参考文献	52
------------	----

致谢	56
----------	----

1. 前言

站在 2020 年，回望过去数十年，地面蜂窝通信系统和卫星通信系统都取得了辉煌业绩，促进了人类社会前所未有的加速发展。

20 世纪 70 年代中期，美国贝尔实验室提出了具有里程碑意义的蜂窝概念。从此，地面蜂窝移动通信飞跃发展，大约每十年完成一次标志性的技术革新，短短四十余年，从 1G 模拟语音通信发展到 5G 高速宽带通信。2020 年，是 5G 商用元年。未来十年，5G 将渗透到各行各业，改变人类社会生产、生活方式。5G 方兴未艾之际，全球产学研已正式启动 6G 的探索研究工作。

1962 年 7 月，美国电话电报公司 AT&T 发射第一颗通信卫星 TELESTAR-1，实现跨大西洋电视直播，奠定了商用卫星的技术基础。1965 年，美国发射通信卫星 Intelsat-1，标志着通信卫星进入实用阶段。

自从 1963 年美国宇航局成功发射第一颗地球同步静止轨道卫星 SYNCOM-II 以来，GEO 卫星通信系统凭借其广覆盖、大容量、快部署等优势，得到长足发展。Inmarsat、Thuraya、TerreStar 和 SkyTerra 先后投入商业运营，为全球提供音/视频广播，为偏远陆地、海域、空域提供必要通信。近十年，点波束和高频段得到广泛应用，GEO 通信卫星容量极速提高，正在研制中的 ViaSat-3 星座，每颗卫星有望提供 1000Gbps 的容量。

20 世纪 90 年代，摩托罗拉设计的“铱”卫星开始提供移动通信业务，成为世界上第一个投入实用的大型低轨移动通信卫星系统。

2014 年以来，随着航天技术的进步，低轨星座的成本大大降低，OneWeb、SpaceX 等新一代商业航天企业快速崛起，加之不断膨胀的全球互联网需求，低轨卫星互联网建设急速升温，成为全球热点。卫星互联网已被规划为“新基建”信息基础设施之一。

在过往的数十年中，由于技术和市场等因素，总体而言，地面蜂窝通信系统和卫星通信系统独立发展。未来，面向泛在通信和万物智联的迫切需求，地面蜂窝通信系统和卫星通信系统优势互补，融合发展，资源共享，将会迎来新的机遇。虚拟化、大数据、AI 等技术的成熟，也为空天地一体化发展提供了良好的技术基础。

如何构建空天地一体化通信系统，如何在 6G 时代构建服务全人类的网络，

这是两个摆在所有通信人面前的问题，也是本白皮书讨论的起点。

希望我们论述的不只是一个设想，而是一个伟大的开始。

2. 发展驱动与愿景

2.1. 驱动力

纵观通信系统的发展历史，无论是地面蜂窝通信系统还是卫星通信系统，无一例外都是在业务需求和技术发展共同驱动下发展的。空天地一体化通信系统发展的驱动力同样来自这两方面。

1、业务需求

(1) 广域万物智联

未来，自动驾驶汽车、无人物流系统、远程作业机器人等智能系统，将在全球全域广泛部署，成为人类生产和生活的重要组成部分。届时，这些智能系统之间的信息交互和协同工作将是普遍存在的场景。然而，受制于有限的覆盖能力，地面通信系统难以为广域智能系统协同工作提供有效的网络服务。

(2) 全球随遇接入

随着信息交互需求在人类社会生产和生活中的渗透，人们对通信服务的要求进一步提高，要求支持全球全域业务连续性，并获得一致性的服务体验。一方面，不管是简单的步行，还是在高速移动的高铁或飞机上，人们都期望能享受到一致性的服务。另一方面，在地面基础设施损坏导致地面网络无法正常使用或没有地面网络覆盖的情况下，也要求能提供不间断的通信服务。

2、技术发展

(1) 卫星技术

卫星制造企业通过技术改进、流程优化和理念创新等多种方式大幅提升了卫星制造能力，并通过模块化、通用化（货架模式）、研制并行化、制造先进化等手段，降低了卫星的低成本研制。另一方面，软件定义载荷技术的快速发展，使得卫星载荷的灵活性得到极大的提高，功能按需加载，能够适应未来动态变化的任务需求。

(2) 运载技术

运载火箭的重复使用技术，大幅降低了空间飞行器的发射成本。另一方面，在充分利用火箭运载能力的前提下，高密度堆叠式设计极大地提高了卫星发射密度，实现一箭多星，降低发射成本，为未来建设大规模的卫星网络提供了有力支

撑。目前，SpaceX 通过多次回收的猎鹰 9 火箭，采用两摞堆叠放入整流罩，可实现一箭 60 星的发射能力。

（3） AI 技术

近年来，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 技术同样在通信领域实现了初步应用，比如通过对业务需求的精准预测来降低网络能耗、优化网络部署等。未来，AI 与通信将会更加深度融合，解决复杂的异构通信系统问题。

（4） 安全技术

空天地一体化通信系统具备开放融合、异构共存和泛在连接的特征，数据安全性是制约其发展的重要瓶颈。区块链是一种极具潜力的安全技术，近年来在金融、医疗、物流供应链等领域得到了快速的发展。区块链由非对称加密、分布式共识、P2P 网络、智能合约、激励机制等组合而成，具有去中心化、不可篡改、可以追溯、公开透明等特点。这些特点使区块链技术能够有效解决数据存储和传输的安全问题。

2.2. 发展愿景

在业务需求和技术发展的双重驱动下，卫星通信和空间通信将与地面通信一体化发展，从业务、体制、频谱、系统等不同层次进行融合，构建空天地一体化通信系统，实现全球无缝立体覆盖。

空天地一体化通信系统是 6G 的一种典型体系架构，其愿景是满足十年后的广域智慧连接和全球泛在无缝接入需求，为广域的对象建立智能连接，提供智慧服务，为人类提供全球无间断且一致性的信息服务。

空天地一体化通信系统具有三大典型特征：统一的空口技术、统一的网络架构和统一的智能管控。统一的空口技术是指卫星通信、空间通信和地面通信采用同一框架下的空口传输技术，终端可实现极简极智接入；统一的网络架构是指在统一的逻辑架构和实现架构下将卫星通信、空间通信和地面通信进行一体化设计，网络功能可柔性分割和智能重构，适应卫星载荷资源有限和业务需求动态变化的特点；统一的智能管控是指通过对系统资源等进行统一的调度和控制，实现网络全局优化和资源绿色集约。

空天地一体化通信系统的核心要素是智能化和虚拟化。未来，从终端到网络无处不在的感知能力和计算能力，为 AI 提供了广泛的数据基础和推算基础，AI 将渗透到物理层算法、无线资源管理、网络功能编排以及业务增强等各个层次，实现系统智能化；另一方面，通过对时空频无线资源、计算资源、存储资源、接口资源以及网络功能等进行虚拟化，可实现空天地一体化系统的资源统一调度和网络统一管控。

空天地一体化通信系统主要有四大类型的应用场景：广域宽带接入、广域大规模连接、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；广域大规模连接是指为农作物监控、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/探测等场景提供连接；广域时敏连接是指为远程智能机器（人）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。

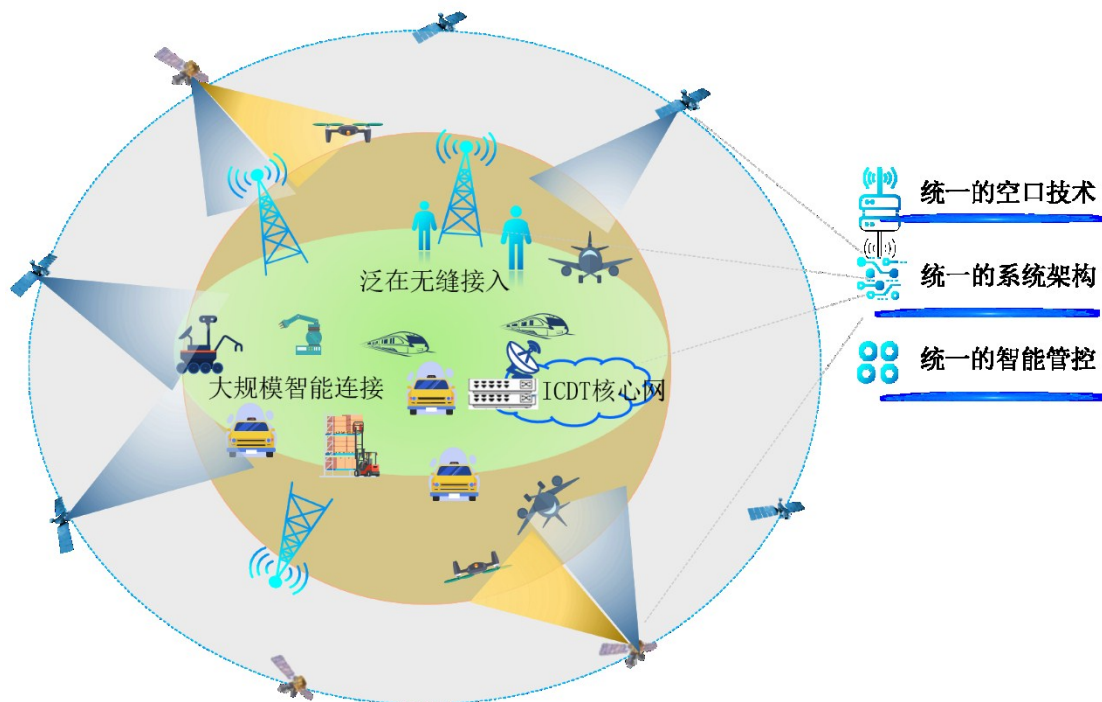


图 1 空天地一体化通信系统愿景

3. 需求与挑战

3.1. 网络能力需求

相对于传统卫星通信系统，空天地一体化通信系统需要具备更全面的能力，不仅需要传统的通信能力，还需要计算能力、AI 能力和安全能力。

(1) 通信能力需求

通信能力是未来 6G 空天地一体化通信系统发展的基本需求，其覆盖范围将拓展到全球全域，支持终端移动速度超过 1000km/h，传输速率大于 1Gbps、传输时延低于 10ms、频谱效率较传统卫星通信系统提升 4 倍以上等。

(2) 计算能力需求

未来，星座卫星和高空平台等网络节点将是 6G 算力网络的重要组成部分，需要在资源受限的条件下，提供高性能计算平台，支持高达数十 TFLOPS 计算速率，为广域业务和网络管理创造高性能、低时延、大带宽的服务环境，同时具备算力协同能力和算力动态迁移能力，适应网络拓扑结构的快速变化、卫星载荷资源有限等特点。

(3) AI 能力需求

AI 能力是空天地一体化通信系统的核心能力，包括感知、学习、推理、预测和决策五大能力。通过泛在的信息采集，感知传输需求和安全风险；具备自我学习和自我演进能力，实现对新业务和新威胁的识别；依据大数据对未来可能发生的业务变化和网络安全事件进行推理和预测；综合利用各种技术进行决策，为用户提供个性化服务，对系统资源进行联合优化和调度。

(4) 安全能力需求

空天地一体化通信系统的安全能力体现为数据传输安全和网络行为安全，解决异质异构复杂网络中各类主体广泛参与带来的安全和隐私问题。空天地一体化通信系统需要形成不断生长的内生安全机制，应对动态变化的网络安全威胁。

3.2. 面临的挑战

空天地一体化通信系统具有网络异质异构、空间节点高度动态、拓扑结构时变、极大的时空尺度、空间节点资源受限、卫星广播传输链路易受攻击等特点，这些特点对网络架构、星地融合通信制式、星间组网协议等方面的设计提出了更

高的要求。

（1） 节点高度动态

传统地面网络各节点相对固定，而空天地一体化网络中各类卫星之间以及与地基网络之间存在高速相对移动，如果考虑高空平台、飞机、低空无人机等节点的接入和组网，其运动特征通常更加不具备规律性，影响会更大。节点的高度动态特性带来的主要影响之一就是通信中伴有严重的多普勒频偏，同时导致通信链路容易出现高中断率和高误码率，这些传输特性对空天地一体化通信制式的设计提出更高的要求。

（2） 高速拓扑变化

在空天地一体化通信系统中，网络由卫星、高空平台、中低空悬浮器/飞行器和地面设备等不同层次的节点组成，具有一个和传统地面蜂窝通信网络截然不同的三维立体架构。网络中节点的运动还将导致网络拓扑结构呈现高动态变化特性。网络的高速拓扑变化一方面会造成链路变化，难以通过固定流量来传输数据；另一方面，网络协议在多跳、中继等不同变化下面临非对称链路、链路质量变化与高可靠传送反馈控制的矛盾，将造成应用层传送效率低，甚至无法保证数据传送质量。

（3） 时空跨度极大

由于空天平台距离远、速度快，使得网络节点间链路在时空跨度上远远超过地面网络。一方面，节点间传输信号衰减损耗大且容易受到轨道变化、仰角高低、太阳闪烁、大气散射、雨衰、遮挡等一系列因素的影响，造成接收信号微弱且存在多种干扰，这一现象在高频段将更加严重。另一方面，长距离传输和空间环境的影响也将导致通信过程中存在高时延和大抖动的问题，这将导致反馈适应机制面临及时调整与长时延的矛盾，使得常规的差错控制方法难以奏效。

（4） 异构网络互联

空天地一体化通信系统由多种异构网络组成，各网络所处环境以及自身特点差异极大。对于卫星空间网络，不同轨位的卫星信号和传输特性差异较大；而对于地面网络来说，空天地等不同的通信环境条件差异也很大。为了实现空天地网络的一体化、兼容化和融合化，往往需要波形体制和通信制式的设计具有统一性和相似性，而前述的异构网络互联特性必然使得这一目标变得更加困难。

（5） 载荷资源受限

通信卫星是一个功率资源受限的系统。一方面，受制于火箭发射能力，通信卫星的重量和尺寸是有限的，从而限制了太阳能板的尺寸，使得可获取的功率资源受限。另一方面，有效载荷的功耗受到卫星热辐射能力极大的限制。热辐射器面积越大，整星散热能力越强，可支持的功耗就越高。但是受到卫星整流罩轮廓尺寸的限制以及卫星天线的影响，热辐射器尺寸不能无限制增大。随着卫星通信需求向更高峰值速率、更多连接数量方向发展，星上功率资源受限与增大发射功率、提高星上处理能力这一矛盾将进一步加剧。

（6） 广域传输安全性

空天地一体化通信系统通过卫星、高空平台等手段实现对用户的广域覆盖。然而，卫星通信的无线信道具有开放性和广播性等特征，导致信息传输通道不可控，无线链路更容易受到人为干扰、攻击、窃听和重放等威胁。因此，空天地一体化通信系统的发展需要解决广域覆盖条件下的传输安全挑战。

4. 立体融合网络架构

未来的空天地一体化通信网络，是以地面网络为依托、以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，采用统一的网络架构、统一的技术体制和统一的系统管控，实现业务全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信。

4.1. 网络总体架构

空天地一体化通信系统是典型的异质异构网络，总体架构如下图所示。网络总体架构包含物理架构、逻辑架构、实现架构三层含义。

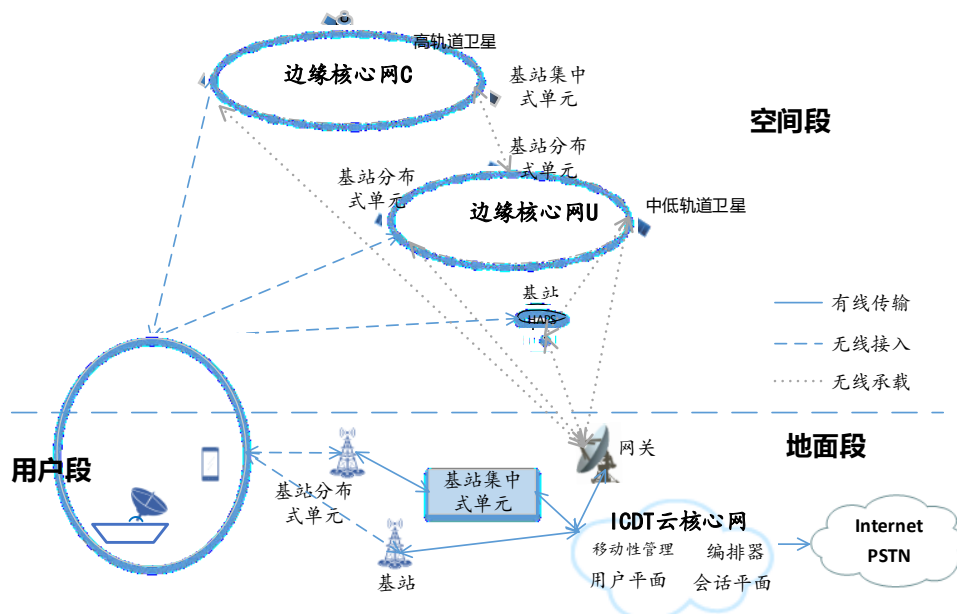


图 2 空天地一体化通信网络总体

● 物理架构

在物理架构上，空天地一体化通信网络由空间段、地面段和用户段三个主要部分构成。空间段包括各种轨道卫星节点和热气球、无人机等高空平台节点；地面段由部署在地面的各类卫星网关、网络运维管理系统、地面基站、核心网元等组成；用户段包括机载、船载、车载终端，以及各类手持设备等。

● 逻辑架构

在逻辑架构上，空天地一体化通信网络分为接入网、承载网和核心网三部分。接入网由各层非地面网络节点和地面蜂窝接入节点组成，形成覆盖全球的无线接

入网络，满足陆海空天广域海量用户的网络接入服务需求。承载网包括地面承载网和卫星承载网两部分。地面承载网是指传统地面蜂窝通信系统中的承载网。卫星承载网由各种轨道卫星和高空平台节点间相互联网而成，各节点具备宽带传输、路由交换等能力，通过节点间链路完成各类业务数据在空中网络中的快速转发。核心网是分布式的，由部署在非地面网络节点的边缘核心网和部署在地面节点的云核心网两部分组成，边缘核心网和云核心网通过算力调度实现边云协作。

● 实现架构

在实现架构上，借鉴微服务思想，空天地一体化通信网络采用资源虚拟化技术，实现接入网、承载网和核心网的星地一体虚拟化。利用大数据和 AI 技术，根据全球全域不同应用场景需求，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（NaaS, Network as a Service）的总体架构，从而实现空天地一体化通信网络按需智能重构。

在网络即服务的架构下，空天地一体化通信网络可灵活地配置成如下模式：

（一）卫星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卫星网络接入到地面的核心网；（二）卫星具备部分基站的功能，如分布式单元部署在卫星网络上，集中单元部署在地面；（三）卫星具备与地面基站等同的功能，集中单元和分布式单元都部署在卫星网络上；（四）卫星网络上部署基站和“边缘核心网”网元，承载部分或者全部地面核心网的功能。

4.2. MSB 接入网架构

全球全域应用需求和部署场景的不断扩展，对空天地一体化网络架构设计提出了更高的要求，除传统的效率要求之外，还要求具有可扩展性、可演进性、鲁棒可靠性等特点。另一方面，空天地一体化网络架构设计面临着空间节点资源有限、网络拓扑结构动态变化等挑战。目前，基于微服务架构的 5G 核心网在网络效率和灵活性方面取得了良好的效果。从全局范围来看，面向服务的端到端体系架构为实现高效、柔性和鲁棒的网络服务提供了可能。其中，无线接入网的服务化设计是关键的一环。

在无线资源虚拟化和计算平台虚拟化的基础上，借鉴 5G 核心网“微服务”的思想，将传统接入网协议栈功能的粒度细化，打破接入网协议栈的层级关系，将各层相似功能按照微服务的方式进行重新封装，从而实现无线接入网的服务化

设计。例如，可以将原来分布在 MAC 层、RLC 层和 RRC 层的重传功能进行抽取，重新封装成“重传控制服务”，将原来分布在 MAC 层和 RRC 层的资源配置功能进行抽取，重新封装成“资源配置服务”，同样原理，还可以封装出“信号处理服务”、“无线连接控制服务”、“无线会话控制服务”等等，如下图所示。

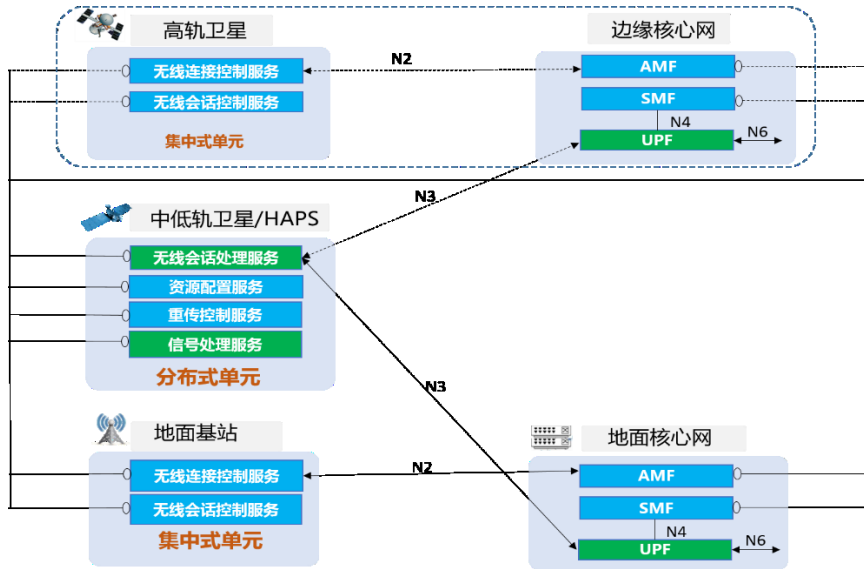


图 3 MSB接入网架构

相比传统的接入网协议栈分割机制，接入网功能微服务化能够更好地适应空间节点资源有限的特点，以微服务的粒度将接入网控制面和用户面功能按需部署到地面或空间节点平台上，形成接入网络功能柔性分割机制，提高网络功能星地分割方式的灵活性；从网络功能实现开发的角度来看，微服务化的方式能够提高接入网软件开发的敏捷性，适应未来全球应用场景的发展需求；此外，通过接入网功能微服务化，与核心网功能微服务化保持一致，更容易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。

在基于微服务的无线接入网架构中，需要构建虚拟化环境和无线业务管理调度平台。然而，在空天地一体化通信系统中，接入节点复杂多样，硬件环境和性能差异很大。现有的虚拟化平台对异构硬件环境的适应性不足，需要进行升级优化。同时，传统的网络功能编排器缺乏对无线业务的描述和专用硬件设备的支持，还需要进一步发展。

4.3. 分布式核心网架构

在空天地一体化通信系统中，采用分布式核心网架构，将部分核心网功能部署在空间节点，建立边缘核心网，同时在地面建立云核心网，能够有效降低业务

传输时延，提高系统鲁棒性。部署在空间节点的边缘核心网是功能极简内聚，且无明显网元边界的功能实体；部署在地面节点的云核心网主要负责资源调度、策略编排、复杂信令处理以及深度报文处理等。通过网络功能重构的方式实现核心网功能的动态部署，适应未来应用场景变化和网络运营需求。

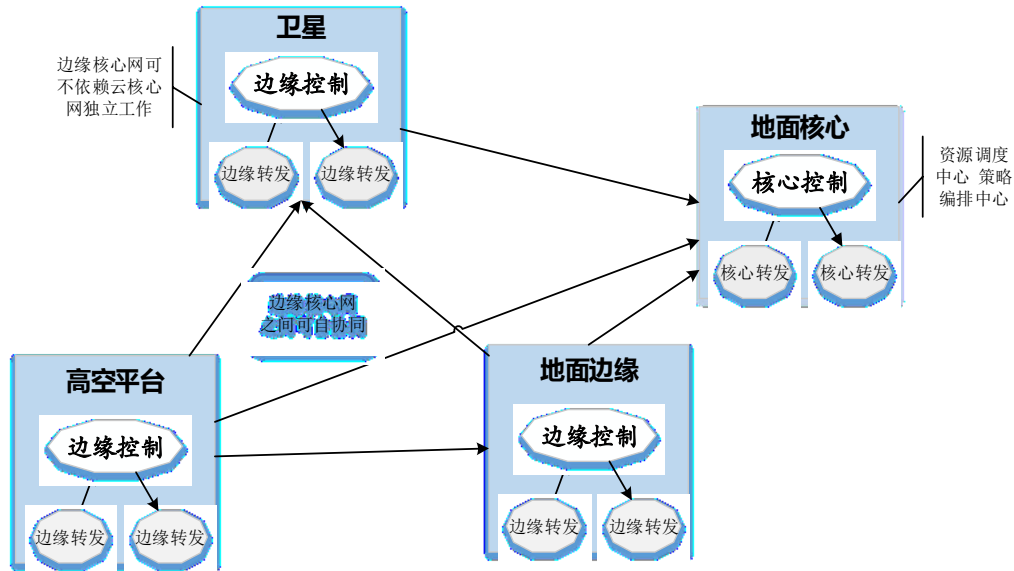


图 4 分布式核心网架构

分布式核心网需要解决以下关键技术问题，才能更好地适配空天地一体化通信系统中空间节点资源受限、网络拓扑结构动态变化等特点，从而提高网络效率。

（1）边缘核心网全无状态计算

在云计算技术中，无状态计算架构是指采用计算与存储分离的设计，计算节点专注运算，存储节点专注持久化，从而实现计算节点任意弹性伸缩，任意功能迁移，而不影响业务。云核心网处理量大，计算/存储的业务量在百万级以上，采用全无状态设计，性能影响巨大，且快速恢复很难做到业务无损。因此，云核心网只能实现“有限”的无状态计算。部署在空间节点上的边缘核心网具有分布式，业务量小的特点，特别适合采用全无状态计算架构设计。具备全无状态计算能力的边缘核心网，可在业务无损的情况下，实现星上计算能力按需调度和角色智能时变。

合理的计算-缓存-持久化比例设计和在不损失可靠性前提下最少资源占用的多副本存储设计是无状态设计的关键技术。在空间节点资源受限情况下，如何在计算效率和计算实时性之间取得最佳平衡，以及如何充分利用资源设计高可靠的存储是边缘核心网面临的技术挑战。

(2) 边缘核心网算力角色智能时变

边缘核心网需要承载接入管理、鉴权管理、策略管理、会话管理、移动性管理、寻呼管理等逻辑功能。如果将所有功能都集中部署在单个边缘核心网上，则难以实现边缘核心网的轻量化计算，使得资源受限卫星载荷面临挑战。如果将这些逻辑功能，以固定的方式分布部署在多颗卫星上，则会由于各逻辑功能对算力需求的差异，导致资源利用率低。边缘核心网采用卫星节点全分布式部署，且算力角色可动态智能调整的计算架构，是提高卫星载荷计算能力效率的有效途径。比如，在业务忙区，星上算力不足的情况下，可以动态使能对算力需求小的鉴权管理和策略管理功能；在业务空闲区，可以动态使能对算力需求大的移动性管理、寻呼管理功能。

算力角色智能时变的关键设计要素是如何动态实时地感知星上算力的能力，以便在合适的时刻，使能与算力能力匹配的计算功能。另外，动态使能逻辑计算功能，要求这些逻辑计算功能是无状态可任意迁移而不影响业务连续性的。

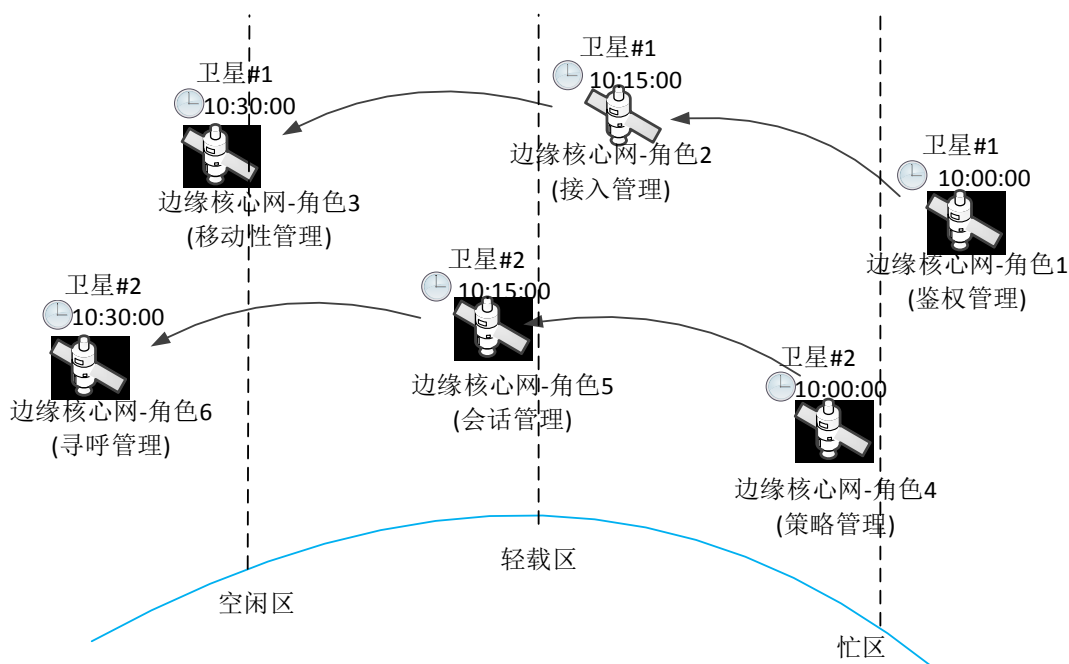


图 5 边缘核心网算力角色智能时变

(3) 边云核心网算力协同

由于空间节点存在高速运动、业务分布不均等特点，若空间节点算力部署方案采用静态规划的方式，将出现空间节点算力与业务需求不匹配和利用率低的问题。在业务繁忙区，空间节点算力只能满足部分业务的计算需求；在业务轻载区或空闲区，空间节点算力得不到充分利用。

在空天地一体化通信系统中，引入算力调度架构，对云核心网和边缘核心网的算力进行精准分配和调度。算力调度中心，可根据终端特性、业务质量要求以及业务特征等，协同分配边缘核心网和云核心网实时算力，适配业务非均匀分布状态，提高计算资源利用率。

算力协同的技术难点在于发展一套适合空天地算力协同的算力发布机制，算力实时感知机制，算力调度机制，算力回收机制，以及算力节点异常的容错处理机制。

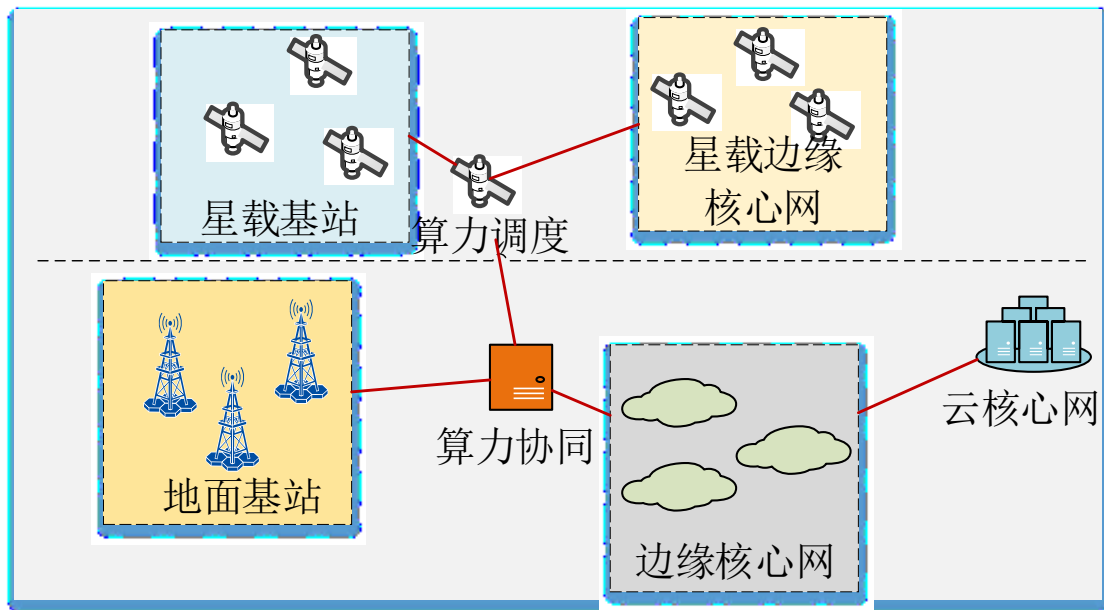


图 6 边云核心网算力协同

5. 关键技术方向

5.1. 无线传输技术

5.1.1. 新型载波调制

在通信系统中，载波调制方式实质上决定了数据传输的方式，以及系统的容量、频谱利用率和时频同步方案等，是现代数字通信系统中极为重要的基础技术。载波调制一般可分为单载波和多载波调制。多载波调制方式凭借其性能优势，是未来宽带通信主要发展的趋势。

目前，正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术是发展最为成熟的多载波调制技术，然而 OFDM 对于频偏十分敏感，星地之间高速相对移动导致的多普勒频偏将使其准确频率同步变得更加困难；其次，卫星功放非线性特性也会加剧 OFDM 高峰均功率比 (PAPR) 的影响；同时，OFDM 带外衰减慢，会进一步约束一体化网络中的频谱分配和共享能力。在空天地一体化通信系统中，必须发展新型的载波调制技术，以对抗卫星载荷中大功率射频器件的非线性特性以及星地链路传输的非理想特性，提高整个系统的传输性能和效率。

广义频分复用 (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM) 是由德国“5G NOW”项目组提出的一种改进型非正交多载波调制方案。GFDM 的系统框图如下图所示。在发射端，待传输的二进制序列首先经过编码和符号映射，然后通过串并转换为 $K \times M$ 的数据块，其中 K 表示系统的载波数， M 表示每路载波包含的符号数。每一个子载波上的数据块经过上采样后的每一路复数据符号与成形滤波器进行循环卷积，将该路复数据符号分散在 M 个不同时隙上。每一路复数据符号随后将调制相应的子载波上面；接收端首先进行同步处理，去掉接收序列中的 CP，获得接收序列，然后对接收序列进行均衡，消除衰落信道对信号的影响，最后进行 GFDM 解调、符号逆映射和译码，获得二进制接收序列。

与 OFDM 不同，GFDM 是以数据块为单位进行调制，是一种更加灵活的调制方式，能够将数据扩展成时频二维块结构，可以根据空天地一体化应用场景调整速率和帧长；GFDM 采用非矩形脉冲滤波器作为原型滤波器，且不同子载波的滤波器在时域上具有循环移位的特性，这使得其带外泄露特性更优（如下图所示），利于缓解一体化通信系统频谱资源紧张的问题。同时，传统上 OFDM 每个符号需

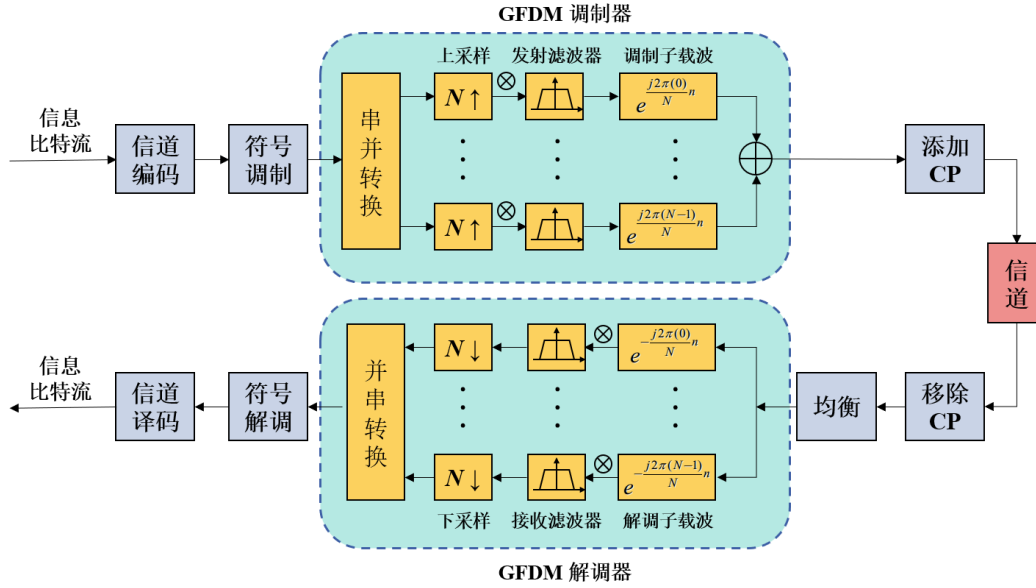


图 7 广义频分复用系统框图

要一个 CP，而 GFDM 一个数据块（共 $K \times M$ 个调制符号）只需要一个 CP 的开销，通信效率更高；除此之外，GFDM 和现有 OFDM 有一定兼容性，有利于未来星地之间调制波形的统一。

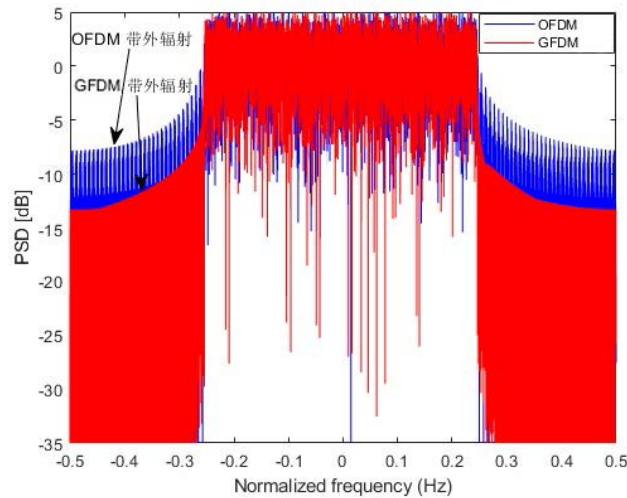


图 8 OFDM 和 GFDM 功率谱对比图

以 GFDM 技术为代表的新型载波调制技术还有许多问题需要继续探索，包括进一步提高带宽利用率，增强对抗频偏的能力，更低的 PAPR 和对零散频段更灵活的利用能力。同时，我们还可以从波形的符号结构出发，联合前后多个符号设计能复用的循环前缀（CP）等方式提高载波调制的效率。

5.1.2. 新型多址接入技术

多址接入是通信系统的关键技术之一。针对终端的泛在连接需求，空天地一体化通信系统对多址技术提出了更高要求，迫切需要解决海量终端随机接入和申请授权时大概率碰撞或阻塞的问题。

传统的正交多址方式通过将时、频、空、码域资源划分为正交资源块，实现多用户之间通信，如频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)、空分多址(SDMA)以及在 4G/5G 中广泛应用的正交频分多址(OFDMA)等。但是，现有的正交多址方式可供划分的物理资源块有限，频谱利用率不够高，难以满足海量终端泛在接入需求。因此有必要发展新的多址接入技术，在正交分割资源基础上，引入非正交多址接入技术，满足空天地一体化通信系统的需求。

非正交多址接入技术通过功率复用或特征码本设计，允许不同用户占用相同的频谱、时隙和码字等资源，接收机通过多用户检测消除干扰，具有很高的过载率，系统的频谱效率和吞吐量获得提升。目前，主流的非正交多址有以下四种，功率域非正交多址接入技术(Non-orthogonal Multiple Access, NOMA)，稀疏码多址接入技术(Sparse Code Multiple Access, SCMA)，多用户共享接入(Multi-User Shared Access, MUSA)，图样分割多址接入(Pattern Division Multiple Access, PDMA)等，表 5-1 给出了四种非正交多址接入技术的比较。

表5-1 非正交多址接入技术的比较

特性 多址技术	关键技术	优势	存在的问题
NOMA	功率域复用，串行干扰消除	能够公平地服务用户	功率域复用技术不成熟，译码复杂度较高
SCMA	稀疏扩频技术，高维调制技术，消息传递算法	码本设计灵活，高维调制增加码本的成型增益	译码器复杂度较高，码本需进一步优化
MUSA	复数域多元码序列扩频，串行干	技术较简单	低相关性复数域多元码设计难度大，

	扰消除		用户间的干扰大
PDMA	利用特征图样辨别各类信号域，串行干扰消除	功率域、空域、码域组合或选择性编码	优化特征图样，思想和技术较为复杂

非正交多址接入技术的本质思想，是使用接收机的复杂度来换取系统频谱效率的提高。然而，在空天地一体化系统中，从卫星侧来看，无论是采用点波束还是跳波束方式，各终端的功率差异不明显，难以实现功率域的非正交多址接入。此外，卫星是一个典型的资源受限系统，星上功率和处理能力都有限，接收机复杂度不宜过高。相比较而言，SCMA 和 MUSA 将是适用于空天地一体化系统的潜在多址技术。SCMA 和 MUSA 原理如下图所示。

SCMA 的主要技术特征是多维调制和稀疏扩频。通过多维调制，SCMA 可以获得调制增益和成形增益。在 SCMA 中，通过多维调制，各用户的比特序列映射为多维码字。通过稀疏映射，各用户的多维码字映射为多维稀疏码字。SCMA 通过使用稀疏扩展来减少叠加时不同用户符号间的冲突，以支持免授权竞争接入。但导频碰撞问题和多用户信道估计问题是限制 SCMA 性能的主要瓶颈。

在 MUSA 系统中，多用户利用短长度的随机非正交复合扩频码在同一资源上传输数据，接收机采用串行干扰消除（SIC）机制进行多用户检测，实现免授权传输和较高的用户超载性能。因为低互相关序列扩展可以保证用户间干扰抑制效果更好，序列扩展技术可以和信号重复一样实现更好的覆盖，不依赖参考信号的多用户检测技术，可以节省导频的开销，以及避开免调度传输所面临的导频碰撞难题。

在空天地一体化通信系统中应用 SCMA/MUSA 还需解决以下关键问题：

1. 卫星信道下的码本/复数域扩频序列设计：卫星通信覆盖范围广、时延较大以及卫星信道开放性的问题，在免授权竞争接入、安全等方面进一步优化码本/复数域扩频序列的设计；
2. 低复杂度多用户检测算法研究与实现：现有非正交多址多用户检测算法的复杂度较高，星上处理较为困难，需进一步优化；
3. 兼容正交多址卫星通信系统：受卫星寿命影响，天地一体化网络中多体

制卫星通信系统共存的局面将长期存在, 为保证用户的服务质量以及技术更新的平滑过渡, 新型非正交多址卫星通信系统应能兼容传统的正交多址系统。

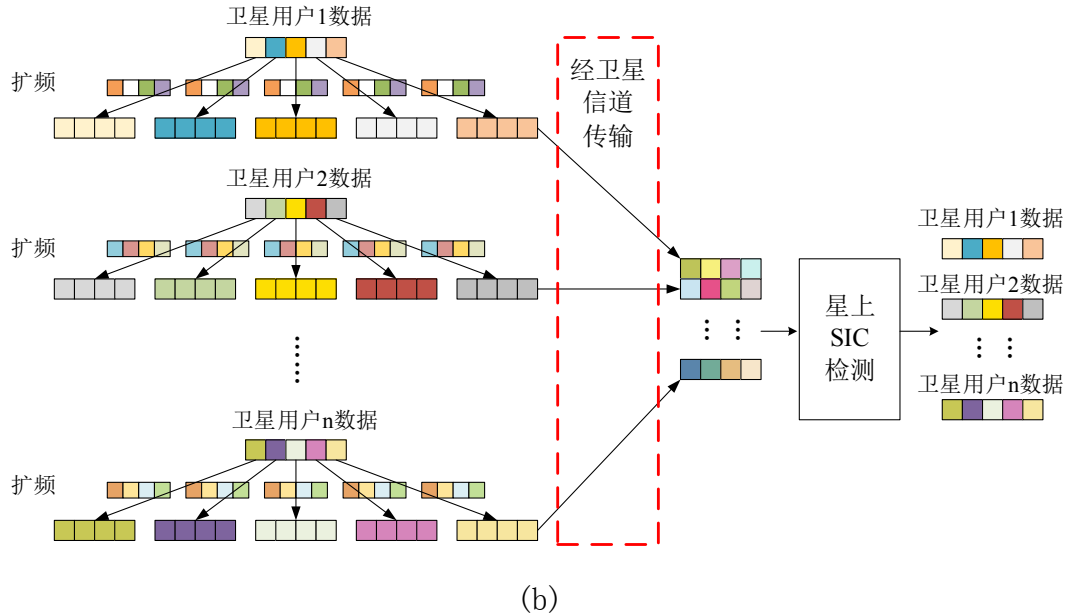
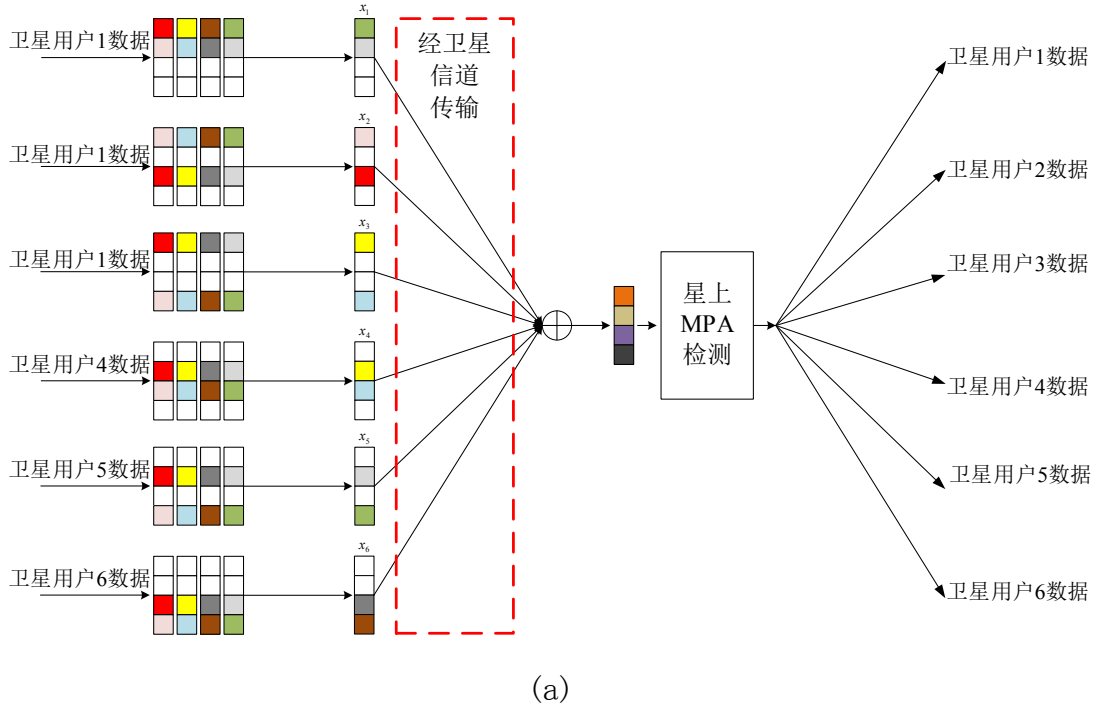


图 9 (a) SCMA 码本示意图 (b) MUSA 系统原理图

5.1.3. 多星波束协作传输

多天线 MIMO 技术作为典型的复用分集技术, 能极大地提高无线通信频谱利用率和传输可靠性, 在地面蜂窝通信系统 4G 和 5G 得到了广泛的应用。在 6G 的

研究中，大规模天线 MIMO 技术的演进仍然是人们关注的重点。然而，在卫星通信中，由于卫星平台尺寸有限，单颗卫星上的多天线装置难以满足 MIMO 技术对信道隔离的要求，很难在单颗卫星应用场景下实现 MIMO 技术。

在空天地一体化通信系统中，星座卫星的部署模式将为应用 MIMO 技术提供基础，通过星间协作，建立虚拟多天线系统，实现多星多波束协作传输。多波束协同传输利用来自同轨或者异轨多星的多个波束协同实现数据传输，通过复用分集技术，可以有效提高星地传输容量，降低系统误码率，满足未来空天地一体化通信系统实现全球无缝泛在接入对系统容量和可靠性的需求。

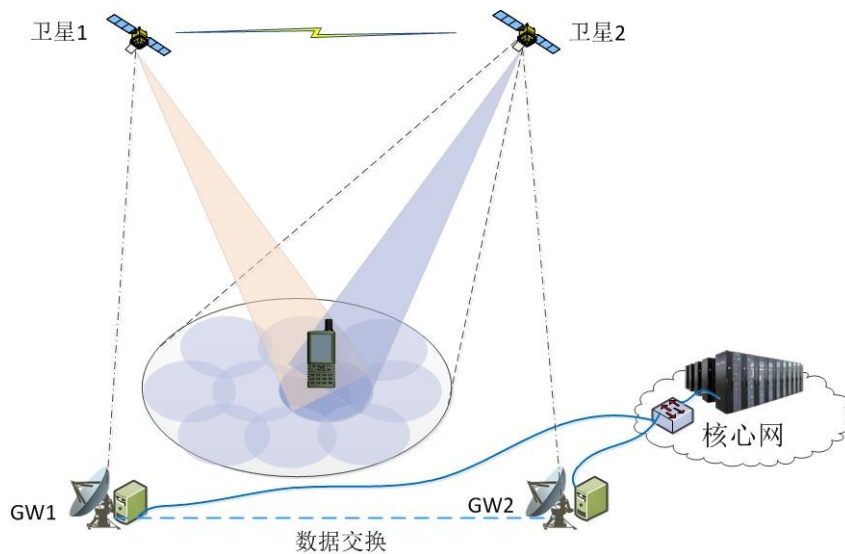


图 10 多星波束协作传输

随着高通量卫星的发展，近几年波束协作传输技术研究逐渐深入。目前协作传输研究大多集中于单星多波束信号处理协同，以多波束之间的用户干扰抑制研究为主，主要采取地面波束合成和联合干扰处理技术，例如 SkyTerra 系统。而有关多星协同传输的研究仍然集中于理论方面，主要采用基于透明转发的简单多星传输模型，信号处理仍然以地面处理为主。

相比地面蜂窝通信系统的小区协作传输，在空天地一体化通信系统中，由于空间节点的高度动态、时空尺度极大等特性，多星多波束协作传输面临很大的挑战。作为多星多波束协作传输的核心技术，自适应波束赋形需要根据高动态精准虚拟 MIMO 信道模型来选择最佳形成图案，以实时形成窄波束对准用户信号，抑制旁瓣，来获得最大增益。然而，卫星具有高移动性且传输距离远，信道始终处于动态变化当中，难以建立一个高精度度的移动信道模型，这将影响多星多波

束协作增益。空间节点的快速移动和大时空尺度对多星多波束之间的同步造成极大的困难,需要探索大型星座卫星之间有效的同步机制以及异步条件下接收算法。另一方面,面向大规模星座卫星构成的空间立体网络,多星多波束之间的干扰更加复杂化,需要发展有效的星间干扰抑制技术。

5.1.4. 星地协同传输

随着资源集约化需求和新兴应用需求的发展(比如远程智能机器之间的协作等),打破卫星通信和地面蜂窝通信网络这两张网的界限,实现星地协同传输已成为通信系统发展的必然趋势。

在空天地一体化通信系统中,空间通信系统与地面通信系统有机融合,星地协同传输,可以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、功率等多维资源进行统一调度,实现资源的最优化配置,满足未来广域智能连接的业务需求。

典型的空天地一体化融合网络部署包括地面蜂窝通信网、低轨卫星通信网和高轨卫星通信网。星地协同传输可以发生同一轨道高度的多个卫星之间,也可以发生在不同轨道的卫星和地面移动通信系统之间。针对不同的业务需求,可以采用不同的星地协同传输模式。通过卫星广播可以实现海量热点内容的广域分发,缓解地面骨干网的传输压力。地面移动通信网和低轨卫星通信网也可以协作为地面终端进行双层网络数据通信服务,比如低轨卫星用于提供信令广覆盖,而地面移动通信网用于高速数据传输。

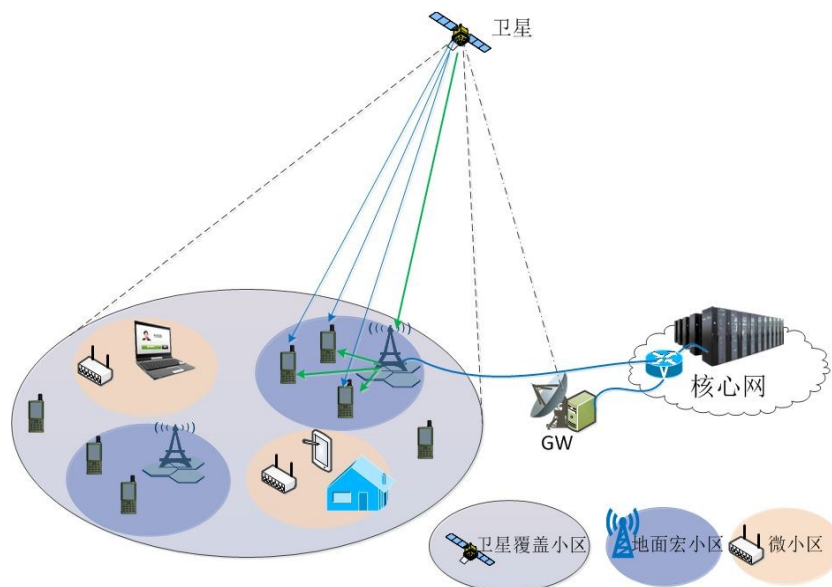


图 11 星地协同传输

星地协同传输技术的技术难点包括系统同步控制和星地干扰抑制等。星地时空尺度差异较大，导致星地协同传输时同步困难。挖掘星地干扰形成的原因，发展干扰预测、干扰规避等技术是提高协同传输效率的关键。此外，提高接入效率、降低接入开销、减少时延以及等问题也需要深入研究。星地协同传输必然带来系统开销的增加，需要研究如何平衡性能增益与系统开销。

5.1.5. 空间高速传输技术

随着大容量通信卫星技术的发展，空间信息高速传输需求日益迫切。美国 NASA 的新千年计划中规划，随着航天侦察设备分辨率的不断提高，未来航天器上的海量侦察数据传输至地面观测终端的速率需求将超过 100Gbps，海量数据的中继和落地问题正愈发突出。与此同时，建立星间链路成为突破星地链路瓶颈、扩大系统容量、降低通信时延的必由之路；使用星间链路可以建立完全独立于地面的卫星网络，有利于提高整个卫星系统的抗毁性、自主性和机动性。

当前，星间链路在国际上已经得到了较为广泛的应用，主要用于跟踪与数据中继卫星系统、军事通信卫星系统、中低轨道通信卫星系统以及海洋和地面观测卫星系统等。如“Milstar”、“AEHF”卫星系统中，每颗卫星可提供 2 条通信链路，星间链路采用 60GHz 的毫米波波束，具有很强的抗干扰性和抗截收能力；铱星系统则采用 Ka 频段，每颗卫星具有 4 条 15MHz 的星间链路。在我国，卫星星间链路的概念最初是在数据中继卫星系统研究中提出，现已在星间天线指向控制技术、星间链路捕获、跟踪技术、星间链路系统仿真技术方向进行了一系列研究，并开展了演示验证实验。星间链路属于无线链路，可以采用微波频段、毫米波频段或激光，然而，在传统的微波通信领域，由于受频谱和轨道资源等限制，难以通过增加空间节点数量和提高单节点能力来提高整个系统的传输能力。

太赫兹通信技术与空间激光通信技术均具有传输容量大、终端体积小、传输安全性好以及频率资源丰富等明显优势，非常适合空间大容量高速信息传输，成为解决空间高速传输的重要手段，逐渐得到了国内外的广泛关注。

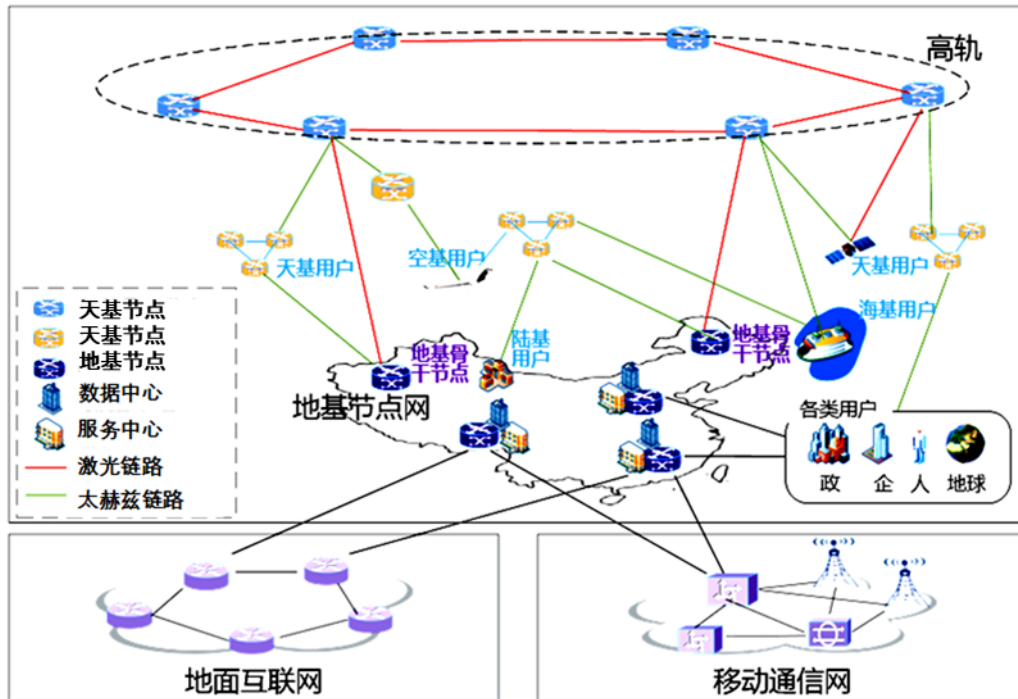


图 12 空间激光通信和太赫兹通信

国际电联已经指定 0.12 和 0.22THz 两个频段分别用于下一代地面无线通信与卫星间通信。美国 NASA 着手太赫兹通信计划，美国空军也于 2020 年 8 月发布“太赫兹通信”公告，向业界征询 100GHz 以上的未来视距空-空通信和联网技术。欧盟将太赫兹星际通信列为太空计划的主要研究领域，研究 0.1THz ~1.5THz 波段的星际通信。中国工程物理研究院电子工程研究所 2018 年突破太赫兹 20Gbps 调制解调信号处理相关核心算法，其 0.22THz 太赫兹通信系统具备速率 20Gbps、大气通信距离大于 10km 的能力，计划 2020 年开展星地 1000km 地面等效验证。

空间太赫兹通信存在太赫兹源功率低、能量转换效率低、接收信号微弱以及接收端信噪比低等问题。为构建空间太赫兹通信网络，实现星间、星地大容量、高速互联互通，需要发展高性能器件与接收处理等方面的技术。在高性能器件方面，需要发展高功率连续太赫兹波或脉冲太赫兹波的产生技术，输出波束质量好，以克服背景太赫兹波的干扰。同时，需进一步提高太赫兹调制器件的性能，并设计精密可靠的高增益、高指向性的天线，以克服现有太赫兹源辐射功率较低的缺点。在接收处理技术方面，需要研究高灵敏度（达到 nW-pW 量级）的接收机，并考虑太赫兹信号的处理过程，研究合适高效的星载太赫兹信号处理技术。

自 20 世纪 70 年代开始,以美国、欧洲、日本和中国为代表的多个国家和地区制定并实施了一系列空间激光通信技术发展和空间试验计划,对大功率发射技术、快速精确跟瞄技术、相干光通信等相关理论和技术进行了深入研究及大量在轨试验。其中,有代表性的项目包括欧洲半导体星间链路试验计划 (Semiconductor Intersatellite Link Experiment, SILEX)、TerraSAR-X 卫星与 NFIRE 卫星相干光通信试验、日本工程测试卫星 6 号计划 (Engineering Test Satellite-VI, ETS-VI)、低轨光学星间通信工程试验卫星计划 (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite, OICETS)、美国月球激光通信演示项目 (Lunar Laser Communications Demonstration, LLCDD) 等。目前,空间激光通信技术已从试验阶段向实用化阶段迈进。

在空间激光通信技术实用化的进程中,地球大气信道对星地激光通信的影响不可小觑。虽然大气信道在几百公里到上万公里的星地链路中所占比例很小,但是,当激光在大气信道中传输时,大气衰减效应和大气湍流效应会对光通信质量造成不同程度的影响,需要采取措施进行克服或抑制。大气信道影响问题的解决途径包括选择处于大气“窗口”的通信波长、地面站选址优化、加大发射光功率、采用大口径接收、高灵敏度接收、地面多点布站、以及自适应光学技术等。

此外,在复杂的空间环境(热、辐射、卫星平台振动等)中,如何提高星载激光通信终端的空间环境适应性,保持长期、稳定的通信性能无疑是我们需要解决的问题。空间环境适应性方面,激光通信终端是一个精密的光、机、电一体化装置,终端一旦发射升空,就要求在长达几年、十几年的任务时间内始终稳定、可靠地工作,这就对终端元器件提出了长寿命和高可靠的性能要求,需要未来在空间环境适应性技术研究基础上,研发长寿命、高可靠的激光通信元器件。

5.2. 网络技术

5.2.1. 星间组网协议

网络协议的设计与部署是实现大规模组网的关键问题。实现长距离端到端数据传输需要网络路由协议的支撑,为数据寻找高效的传输路径。目前,在组网协议方面,地面互联网已经形成了以 TCP/IP 为主的协议体系,技术相对成熟,能够良好地适应地面网络传输环境。然而,卫星高速移动带来的星间拓扑高动态性、星地及星间的大传输时延以及卫星计算能力与功耗的限制等这些特性使得地面

成熟的组网协议难以在空间组网中提供有效支撑。因此，为了满足空间网络的组网需求，需要发展新型的组网协议。

当前，在天基信息网络领域，主要有针对深空通信设计的 DTN 协议体系、国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS）为航天测控通信应用提出的 CCSDS 网络协议体系。其中，DTN 主要应用于长延时、节点资源受限、间歇性连接等传输场景，其关键技术点为 Bundle 协议，通过引入点对点的托管机制来保证端到端可靠传输。CCSDS 协议体系主要针对空间通信网络所具备的传输时延大、信噪比低、突发噪声强、多普勒频移大、链路时断时通等特点，在 TCP/IP 协议栈的基础上进行适当的修改和裁剪，为空间通信构建能够实现可靠传输的协议体系。CCSDS 的关键技术为 SCPS-TP 协议，通过简化的连接管理、乱序、错帧、重传等技术、以及报文头部压缩等技术，以较低的开销，实现端到端可靠传输。

相比深空通信系统和航天测控通信系统，空天地一体化通信系统具有星间网络高动态、星地快速遍历切换、且链路速率受限的特点，其支持的业务类型明显增多，数据传输速率也明显提高，并且在全球范围内呈现明显的差异化分布。DTN 和 CCSDS 协议对于这些需求存在明显的局限性，直接应用到空天地一体化通信系统中可能会导致网络效率低下。因此，迫切需要发展适应空间高动态快速遍历切换场景下多业务差异化高速传输需求的组网协议。

在当前卫星通信、空间通信与地面通信系统逐步走向融合，构建一体化互联网的大趋势下，可以预见，空天地一体化通信系统组网协议的发展趋势是借鉴地面成熟的 TCP/IP 互联网协议体系，将 DTN 和 CCSDS 等各协议体系逐渐统一到 TCP/IP 为核心的组网体系中 (IP over X)，而在不同场景中 (如测控) 沿用已有的链路层和物理层技术。

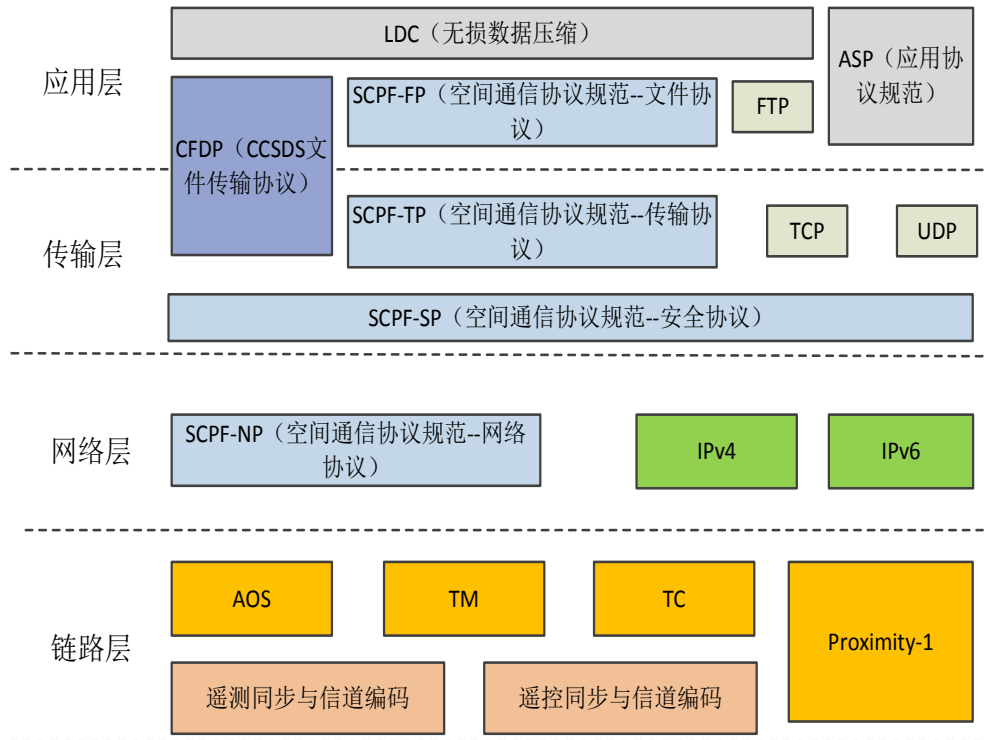


图 13 IP Over CCSDS的网络体系

将 TCP/IP 协议引入到空间组网中存在以下几方面挑战。首先，对于星地快速遍历切换的场景，需要设计新的网络编址规则，有效实现星地之间的地址汇聚，从而降低星间网络的 IP 路由开销。其次，需要充分考虑全球业务的差异化分布，针对星间/星地链路速率受限的特点，设计合理的负载均衡机制，从而提高全网络的传输容量。再次，对于 TCP 协议，需要结合空间网络端到端长时延、链路状态差异化、以及因切换造成时延突变等特点，开展对应的 TCP 加速等相关协议设计，提高端到端吞吐量。

5.2.2. 频谱共享与干扰协调技术

无论是地面通信系统还是空间通信系统，频率资源都是不可再生的稀缺资源。当前，地面系统通过标准制定形成国际通用的系统标准，并寻求全球协调一致的频率划分，例如 3G/4G/5G 等无线移动通信系统，并可通过国界、地域等进行频率指配。空间通信系统按国际电信联盟“先占先得”的频率使用原则进行频率资源分配。

以美国和欧洲为代表的发达国家自上世纪 90 年代起，将空间频率资源和轨道资源视作战略资源进行了疯狂的储备，目前地球静止轨道平均每隔 1° 即有一

颗通信卫星，双星共轨、甚至多星共轨的现象已非常普遍。除此之外，由于频率资源和轨道资源并未按照轨道进行区分，造成频谱资源分配的拥挤和混乱，快速发展的大规模低轨卫星星座进一步加剧了空间频率、轨道资源的拥挤程度。

众多卫星系统同时在地球外层空间运行，各种空间业务与地面业务之间、不同国家、不同业务系统之间、乃至同种业务系统间都存在频率共用的情况。下图为《无线电规则》频率划分表中，30-50GHz 频段之内的频率划分。以其中的 39.5-40GHz 频段为例，这一频段既划分给了地面的固定业务和移动业务，也划分给了空间的卫星移动业务、卫星固定业务以及卫星地球探测业务，使得卫星频率使用环境日益复杂，发生频率资源冲突的情况也越来越多。

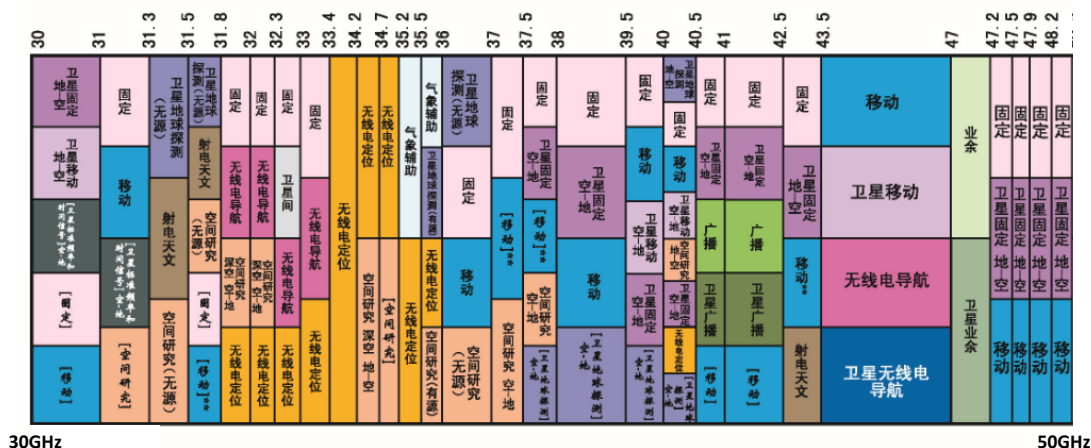


图 14 频率划分情况统计

在空天地一体化通信系统中，卫星、临空平台、地面基站之间形成了多层立体网络，随着用户业务需求的增长，频谱资源变得越发匮乏，传统的频率硬性分割使得传输效率大大下降。为缓解频率资源紧张的局面，迫切需要发展高效频率管理技术，以满足空天地一体化通信系统中快速发展的业务需求。

目前,动态频谱资源共享与干扰协调技术的实现方法主要有两类,一是使用认知无线电技术,自动检测周围无线电环境,智能调整系统参数以适应环境变化,在不对原有业务用户造成干扰的前提下,从时间、空间、频率等多维度利用空闲的频谱资源;二是通过完善的数据库进行动态频谱共享,通过查询数据库来获得一定区域内空闲频谱的情况,从而使用相应频谱资源。

认知干扰协调技术是未来的重要发展趋势，其将宽带频谱分为多个子频段，每个子频段具有满足传输所需的最低带宽。通过选择这些子频段实现认知抗干扰。

该技术支持在传输频带受到干扰时智能切换传输频率，甚至可支持即将受到干扰前就切换工作频率。通过结合认知与学习能力，提高抗干扰能力和效率。

动态频谱共享按固定的时间周期进行业务需求预测，并按系统优先级和调度算法进行频谱资源重新分配。在周期内每个系统只能使用各自分配的资源传输数据。资源重分配的时间周期越短，频谱资源分配的精确度就越高，整段频谱的利用率就越高。实现动态频谱共享的系统之间不但要求时间严格同步，还要求两个系统间周期性进行信息交换和资源重新分配。

认知干扰协调技术和动态频谱共享技术是解决空天地一体化通信系统中频率资源稀缺与低利用率矛盾的有效手段。目前，国内对于干扰认知和频谱动态共享技术虽然已开展了系列探索研究，但更多地侧重于地面信息系统，面向高低轨卫星、HAPS 系统、地面系统融合组网的技术储备与国外差距较大，远不足以支撑我国天、空、地多重信息网络建设用频需求。另一方面，目前我国无线电管理仍以传统的固定分配指配模式为主，频谱动态共享技术的具体应用对我国无线电顶层管理原则提出了挑战，亟待开展进一步深入研究。

5.2.3. 移动性管理技术

移动性管理技术是用来管理用户位置，跟踪用户在网络中的状态，对用户做接入优化，寻呼控制，以及切换处理的关键技术。空天地一体化通信系统中存在切换频繁、用户接入时延大、小区变化快等问题，导致移动性管理更加复杂。5G 中地面小区位置固定、跟踪区静态规划和广播更新等移动性管理技术，都难以直接应用到空天地一体化通信系统中。针对这些问题，迫切需要发展适用于空天地一体化通信系统的智能移动性管理技术。

小区管理和跟踪区管理是移动性管理技术的基础。在地面蜂窝通信系统中，由于基站的覆盖区域是固定的，其小区和跟踪区与基站信号覆盖区域的关系确定，在网络优化部署结束后保持固定不变，然而，在空天地一体化通信系统中，由于低轨卫星的快速飞行，其波束覆盖区域也快速变化，导致地面蜂窝通信系统中传统的小区管理和跟踪区管理技术不再适用。

针对这些问题，产学研各界都开展了探索和研究工作。目前，初步形成以下的解决思路：

(1) 针对小区管理问题，采用波束与物理小区 N:1 的管理模式，即多个波束

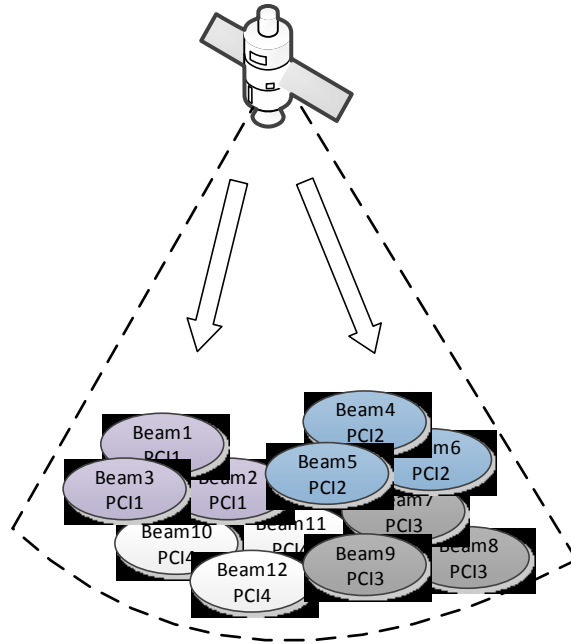


图 15 波束与物理小区 N:1 的管理模式示意图

对应到一个小区。虽然该模式与传统的地面蜂窝系统小区管理方式差异较大，但是，其可以有效减少由于卫星高速运动带来的跨小区切换的频次，从而降低由于频繁切换带来的信令负荷增长开销。

(2) 跟踪区管理技术采用地面固定跟踪区域的方式，即把地面区域划分为固

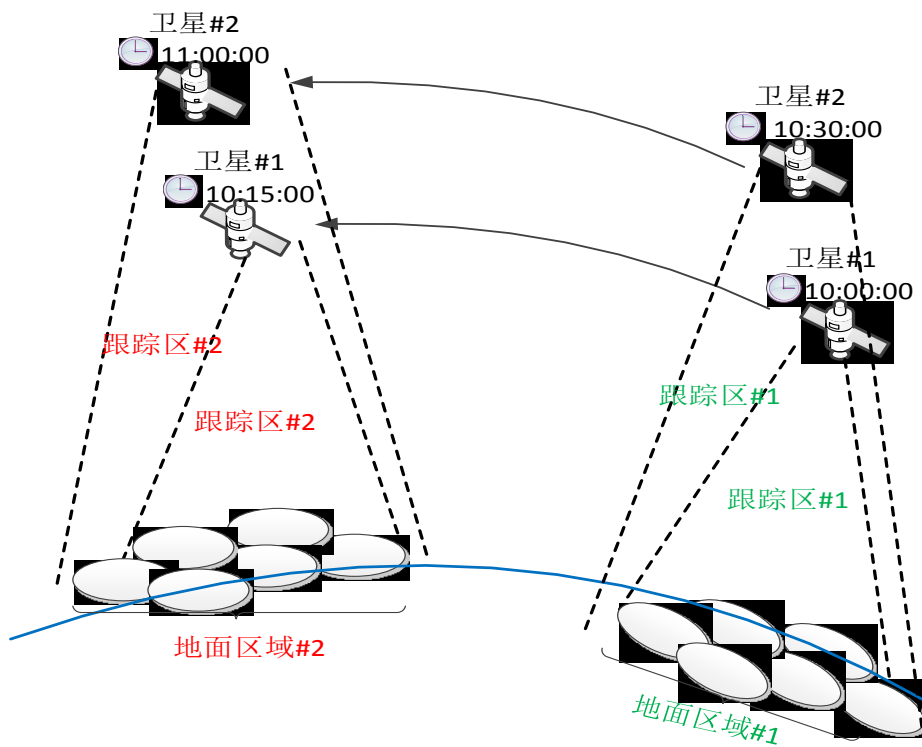


图 16 低轨卫星通信系统跟踪区域管理示意图

定的跟踪区域，如下图所示。卫星依据星历飞行，移动到地面不同跟踪区域，则广播不同的跟踪区标识。该方式可以大大减少卫星运动触发不必要的跟踪区域更新，降低系统信令处理的负荷。

在空天地一体化通信系统中，由于非地球同步卫星的高速移动性，使得每颗卫星服务终端的时间较短，为满足用户业务连续性需求，需要频繁地进行星间切换或波束间切换，因此有必要发展极简、可靠的接入机制和智能的切换技术，缩短终端接入时间，实现在波束之间和卫星之间平滑切换。

传统地面蜂窝通信系统采用典型的四步随机接入过程，基于请求调度/按需分配方式实现网络接入。然而，在空天地一体化通信系统中，终端与卫星之间传输时延大，四步随机接入过程将会导致随机接入时延长等问题。因此，在 6G 空天地一体网络中可以考虑引入 3GPP R16 讨论的两步接入机制，即将四步接入中的 Msg1 和 Msg3 集中在一步发送，称为 MsgA，Msg2 和 Msg4 进一步合并为 MsgB，减少信令开销，降低随机接入时延。另外，针对卫星移动轨迹可知等特点，可对卫星波束服务时间进行预测，通过人工智能技术提前预判和调度无线接入资源，减少随机接入碰撞概率，实现用户智能接入。

相比地面蜂窝移动通信系统，在空天地一体化通信系统中，终端切换场景更加复杂，包括低轨卫星间切换，低轨卫星与中高轨卫星之间切换、空基平台以及地面站之间垂直切换等，切换也更加频繁，这都对切换技术提出更高的要求。增强的切换技术有条件式切换、DAPS (Dual Access Protocol Stack)、以及双连接等。条件式切换，可以在切换需要发生时，把多个目标小区的切换信息提前发送给终端，终端并不立刻发起切换动作，而是对多个目标小区服务质量测量，若某个目标小区满足切换条件，则切换过去。DAPS 则可以在与源侧保持连接的同时，向目标侧先发起随机接入的过程，采用先建后断的机制，使得切换更加平滑。另外，双连接技术，在高低轨采用异频组网的场景下，用于解决异频切换，使得切换更加平滑。在切换技术中引入基于强化学习的人工智能算法，实现 QoS 自动调整，TAList 预分配，MEC 边缘业务的预调度，能够有效提高切换后的业务体验，抑制切换带来的信令风暴等。

随着人工智能技术在通信领域的推进，可以预见，空天地一体化系统的移动性管理技术将向智能化方向发展。比如，通过将用户终端视为一个智能体，将通

信网络视为环境，将用户的切换选择视为动作，将用户当前接入的基站及基站的资源信息作为状态，将切换的时延和资源消耗等视为奖励，从而把移动性管理问题转化为一个强化学习问题，实现在系统复杂约束下的多目标性能优化。

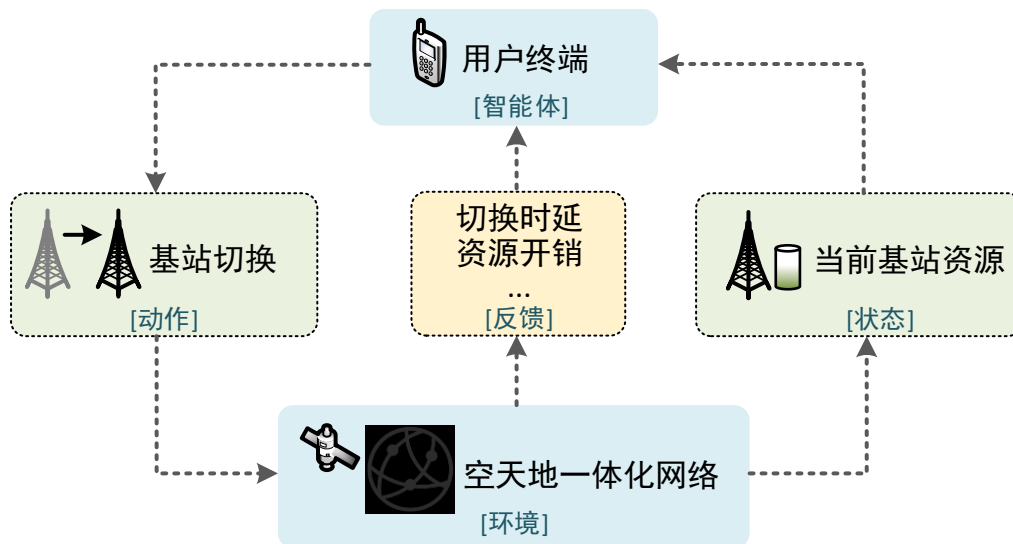


图 17 基于强化学习的移动性管理

以强化学习乃至深度强化学习为代表的智能移动性管理技术研究处于起步阶段，存在许多需要探索的问题。比如，如何从复杂的空天地一体化通信系统中有效地采集合适、真实的数据用于智能算法的训练；如何合理的进行移动性管理模型抽象以及基于反馈机制的模型优化；为了避免大量的数据回传问题，还需要探索更加适合空天地一体化大时空尺度的分布式智能训练方法。

5.2.4. 端到端一体化切片技术

空天地一体化通信系统主要有广域宽带接入、广域物联网接入、广域时敏连接和广域高精度定位这四大类型的应用场景，这些应用场景中存在大量不同服务等级的业务需求。空天地一体化通信系统网络结构复杂且具有时变特性，难以保证不同业务的服务等级。因此，需要发展服务等级保障技术，实现空天地一体化通信系统的精细化服务。

在 5G 网络中，为更好满足不同服务等级的保障，引入了网络切片技术。相比传统的虚拟专网 VPN 技术，5G 网络切片技术进一步在网络中切分出单独的软硬件资源为用户进行专属服务，保障用户 SLA。目前，5G 网络切片的实现主要集中在核心网层面。无线接入网和传输网层面的网络切片还不充分。5G 端到端 SLA 管理和保障技术实施难度较大，还处于探索阶段。

与地面 5G 网络不同，空天地一体化通信系统的网络拓扑结构具有时变特性，导致较难采用静态规划的方式进行切片业务的 SLA 分解和保障；另外，星载平台具有资源受限性和硬件异构性等特点，采用通用服务器架构实现虚拟化管控和切片编排仍具有较大挑战。因此，实现空天地端到端一体化网络切片需在网络拓扑结构预测、人工智能 SLA 保障、接入网和核心网一体虚拟化等方面展开研究。

空天地端到端一体化网络切片通过在通用硬件设备之上构建出多个专用的、虚拟的、互相隔离的端到端逻辑网络，根据用户所在区域、入网时段和占用带宽的动态变化，灵活调配处理不同的网络资源，实现系统的带宽、存储和处理资源得到最优利用，推进业务模式由资源运营向网络运营、服务运营转变。空天地一体化通信系统中的端到端网络切片整体架构如下图所示。

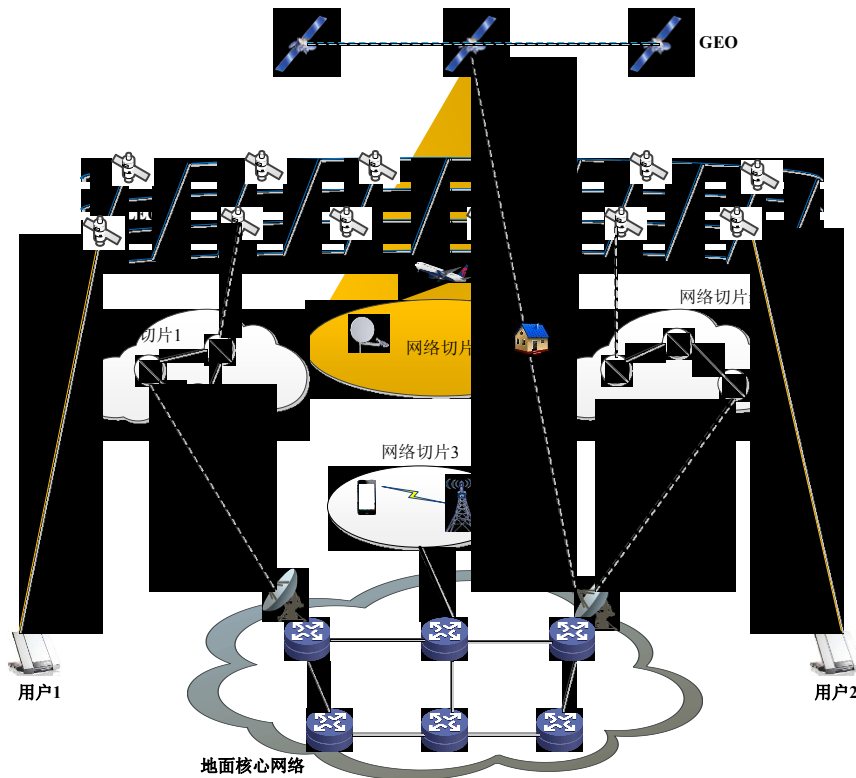


图 18 星地一体化网络切片整体架构

端到端一体化网络切片技术具有以下几个方面的技术特征：

1. 接入网和核心网一体虚拟化

随着星上 RAN 逐渐从专有的 ASIC, FPGA, DSP 演进到基于更优工艺 5nm/3nm、更优计算能效比的通用处理器，通过统一虚拟化技术对接入网和核心网的软硬件进行充分解耦，并在统一虚拟化环境中将接入网功能重构为微服务，从而通过一致的管控逻辑对 RAN 和 CORE 的网络功能进行统一编排。

2. 基于星历计算的动态切片使能

卫星的高速运动，导致采用事先提前静态规划切片资源的方式，会大大降低星上资源受限系统的资源利用率。结合星历计算，采用动态时间片的切片使能技术，是解决该问题的有效技术手段之一。

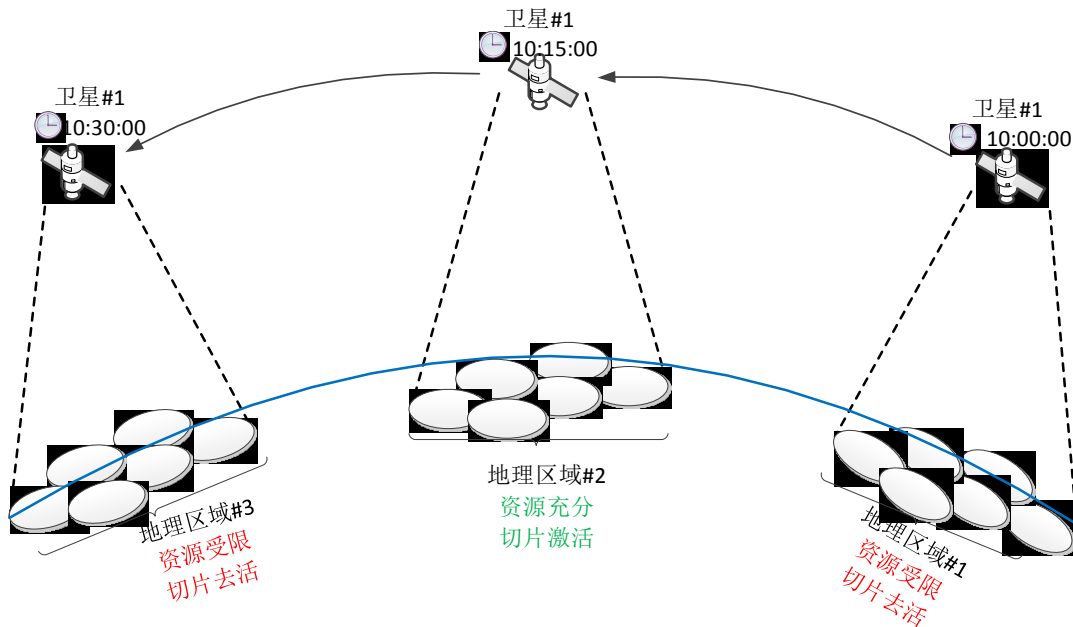


图 19 基于星历计算的动态切片使能

3. 基于AI的端到端SLA保障

为更好的实现星地一体化组网下的 SLA 保障，需要寻求突破传统的 QoS 保障手段，将大数据分析和人工智能技术应用到切片用户体验的智能化分析、端到端切片资源的优化配置，建立一种包括更多输入的、基于预测的、动态的保障方式，提供切片服务质量的高确定性和资源的优化利用。

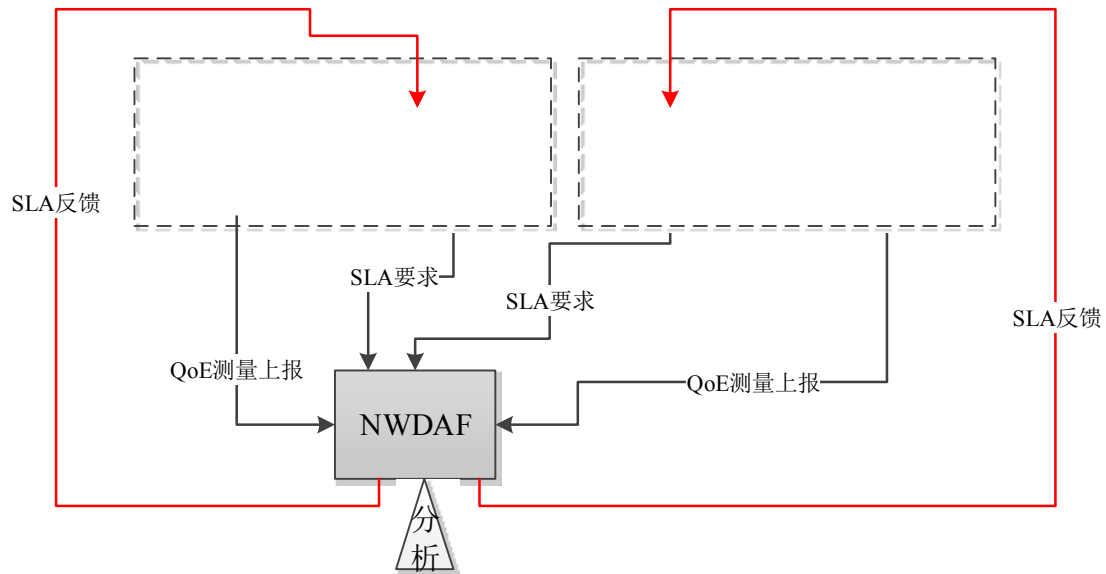


图 20 基于 AI 的端到端 SLA 保障

受异构计算平台、星上资源有限等因素制约，空天地一体化通信系统的端到端切片技术还有许多问题需要探索，包括动态切片管理技术、切片选择机制、基于 AI 分析的切片 QoS 建模以及 QoE 数据反馈效率等。

5.3. 新型星上载荷技术

5.3.1. 星载多波束天线

多波束覆盖是提高空间频谱利用率的关键技术，星载多波束天线已成为通信卫星系统的核心设备。星载多波束天线通过缩小单波束能够增加卫星发射时的 EIRP 和接收时的 G/T 值，支持地面终端采用较小口径的天线实现高速率数据传输；可以进行有效的极化隔离和空间隔离，实现频谱复用，从而使通信容量成倍增加；还可以根据系统需要进行波束扫描、波束重构，提高系统的灵活性。

波束形成技术是星载多波束天线的核心技术。根据波束形成网络的部署位置，分为星上波束形成技术和地基波束形成技术。如下图所示，星上波束形成技术是利用星上波束形成网络，通过对每一个馈源进行加权处理，形成所需指向的多点波束。以目前在轨的 Thuraya-3 卫星为例，在星上通过全数字化波束形成网络，利用 128 个馈源形成 245 个点波束，每个点波束覆盖区域为 400–500 公里，覆盖区域的轮廓和强度可根据不同服务区域的实时负载灵活分配。

地基波束形成技术是将数字波束形成技术与其它数字处理技术放到地面上进行工作的方式，如下图所示，有效载荷仅仅需要天线及相关的射频网络。以应

用该技术的 SkyTerra 卫星为例，其在地面共设 4 个馈电链路关口站，每个关口站都集成了地基波束形成设备，同时控制卫星上行和下行波束的生成，共采用了 152 个阵元，形成了高达 500 个波束，覆盖了北美和墨西哥，以及整个加勒比海地区。同时在地基波束形成设备还可以通过查询波束权重数据库，控制波束数量、信道频率、卫星位置以及指向偏移，从而支持极窄点波束、区域宽波束等多种波束形成方案。

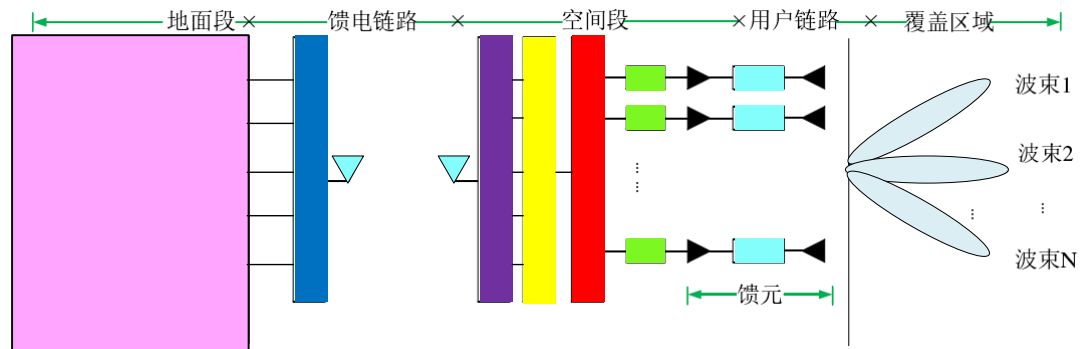


图 21 星上波束形成技术原理

未来空天地一体化通信系统需要通信卫星的通信容量越来越大，需要越来越多、越来越窄的点波束，这将导致星载多波束天线口径越来越大，同时星载波束形成网络也变得非常庞大。这使得星上载荷的质量及复杂度成几何级的增长，使得卫星的空间适应性和可行性受到极大挑战。星上数字波束形成设备非常容易因太空辐射而产生“单粒子翻转”，对系统的可靠性将产生非常大的影响。若采用地基波束形成技术，也需要占用巨大的馈电链路带宽且只能进行“双跳”高延时通信。

面对未来空天地通信高度一体化的挑战，星载多波束天线技术在未来通信卫星系统中将不再是“独立”的天线分系统，它将与系统工作模式紧密联系在一起，同时在有效载荷中所占的比重将越来越大，作用也更加突出。星载多波束天线在未来通信卫星中将具备覆盖特定区域的波束赋形能力、增加系统容量的频率复用能力、按需调整覆盖的在轨重构能力以及满足星间传输的波束扫描能力。

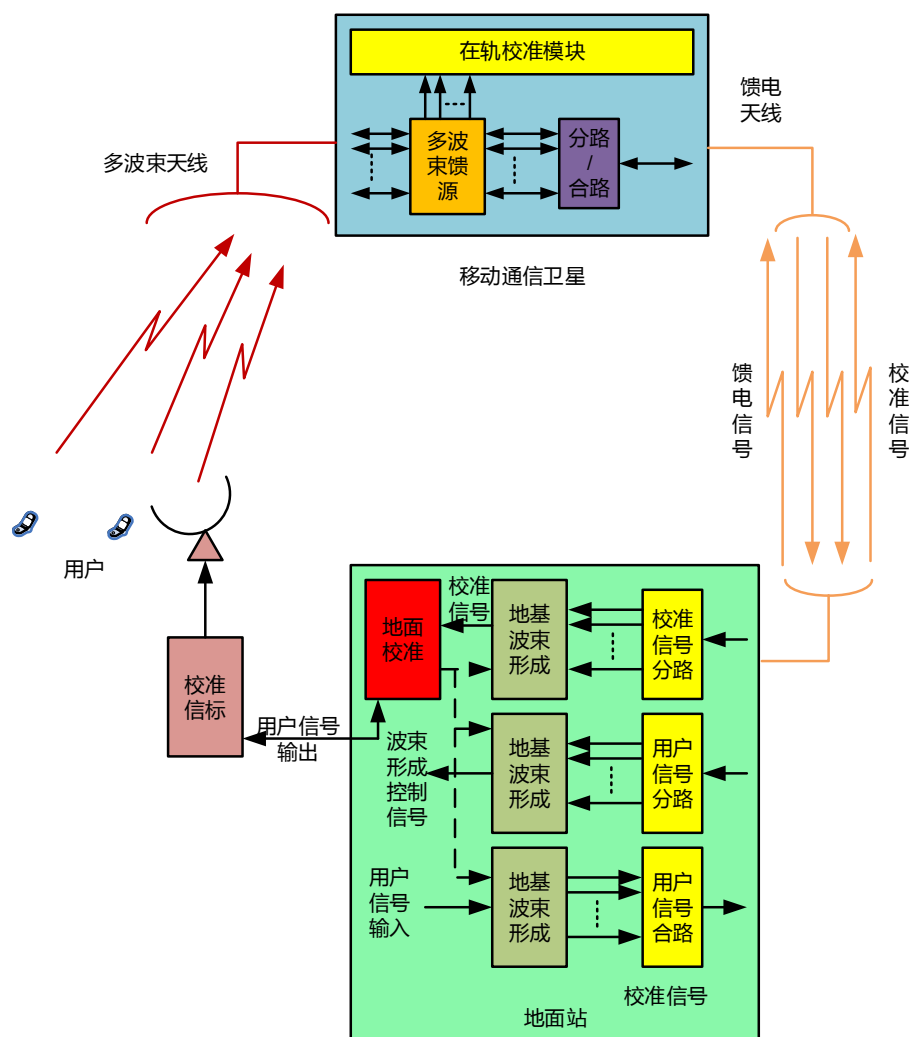


图 22 地基波束形成技术框图

5.3.2. 智能化卫星载荷

通信卫星有效载荷是直接执行卫星通信任务的基带及射频等设备，实现通信信号的处理和转发。随着卫星星座规模的急剧扩大和业务的快速发展，传统航天产业中以硬件为核心的卫星载荷设计模式已无法适应复杂多变的运行环境和任务要求。软件定义卫星载荷技术以天基软件化计算平台为核心，结合灵活的射频前端，采用开放式系统架构，实现功能按需加载和重新定义，能够适应多种任务需求。软件定义卫星载荷技术是未来发展的必然趋势。

目前，基于可调谐滤波器的软件定义载荷可在轨调整信号带宽，通过采用数字相控阵天线可动态改变卫星覆盖区域等，主动定义卫星的性能，使之满足用户需求。采用基于总线的标准化平台架构，减少集成时间，可实现批量生产。

然而，软件定义载荷技术尚处于初步发展阶段，仍存在研发成本较高、研发周期较长、与卫星系统硬件紧耦合、受限于卫星平台能力等问题。未来，面向天地一体化的卫星通信载荷应具备信号处理能力强、软件和硬件解耦、系统功能自主重构等能力。因此，需要发展射频微系统技术和无质量载荷技术。一方面，采用高集成度射频芯片技术和三维异构集成技术等，增加卫星信号接收与发射的空间范围和频率范围；另一方面，采用 FPGA 虚拟化技术和组件化波形实现技术等，增加通信卫星的处理能力和灵活性，实现卫星载荷功能最大程度软件化。

在 AI 技术的推动下，软件定义载荷技术还将进一步向智能化方向发展。智能化卫星载荷以软件定义计算能力和重构能力为基础，结合经过模型压缩的人工智能技术，完成频谱认知和网络认知。完成业务预测和资源分配，使软件定义载荷具备自主应对业务和流量的能力，从而进一步提升卫星效能。

但是，卫星载荷属于资源受限平台，发展智能化卫星载荷技术在实际应用中还面临许多挑战，大数据量天地协同在线增量训练、极高准确度业务实时预测模型、星载轻量化深度学习模型等技术难题均需要突破。

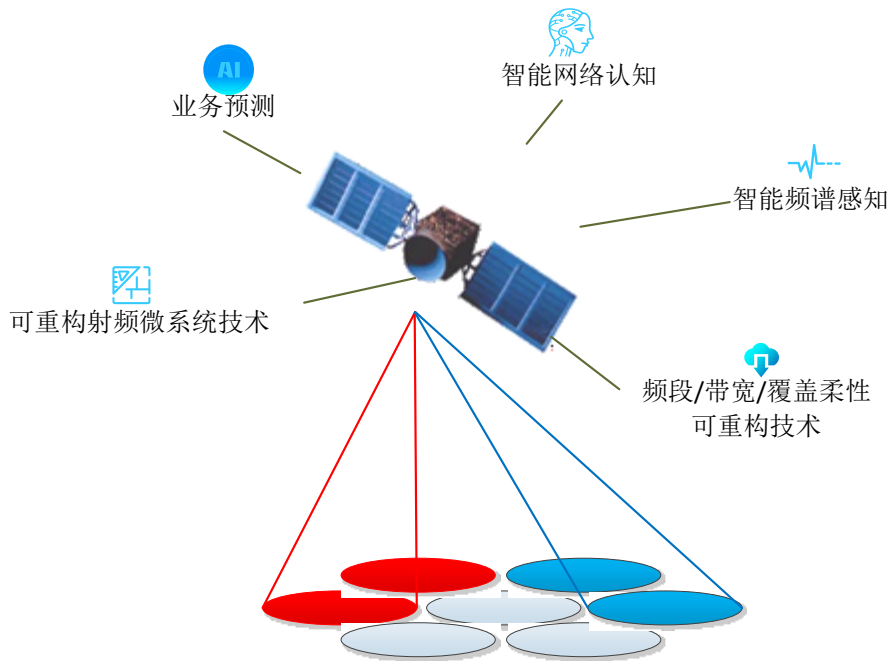


图 23 智能化卫星载荷

5.3.3. 面向软件定义载荷的高效容错设计

在太空环境中，辐射粒子会轰击星载平台上的数字信号处理器（如 FPGA 或者 DSP 等），可能会使某些处理模块的逻辑配置或存储部分发生改变，从而导致

暂时的（软错误）或者持续的处理故障。尤其是未来卫星平台会使用软件定义的有效载荷，为了能够使星上功能能够根据需求进行更改或升级，通常使用可配置的信号处理器（如 SRAM 型 FPGA）。这类芯片的灵活性好、处理性能优越，但是极易受到空间辐射的影响，进一步加剧了星上载荷的可靠性问题。

目前普遍使用的卫星载荷容错保护措施包括硬件加固、系统级保护和电路级容错。硬件加固使用特殊封装工艺的宇航级器件提高系统可靠性。但是宇航级器件性能上的劣势越来越难以满足现代航天应用的需求。因此美国 NASA 率先提出一种商用现货（Commercial Off the Shelf, COTS）技术，拟在航天应用中采用低品级的商业级或工业级器件（统称 COTS 器件）部分甚至全部取代宇航级器件。与宇航级器件相比，COTS 器件具备性能优异、成本低廉、货源充足等诸多优点，但其失效风险较高，需基于冗余资源进行容错加固。系统级保护通过多机备份、周期性故障检测与重配置等机制对系统故障进行恢复。但这种方案开销较大、实时性差，不能保证系统的不间断工作。因此，电路级容错是 COTS 器件应对单粒子效应等故障、实现即时故障纠正的必要手段。电路级容错的本质是通过引入冗余（如逻辑冗余或时间冗余），使处理模块在单粒子效应导致部分逻辑或存储单元发生故障的情况下，仍能保证处理模块输出正确的结果。最常用的方案为三模冗余方案。但这种方案需要在原有处理逻辑基础上增加两倍的计算、存储和功耗开销，这对于体积、重量和功率都严格受限的空间平台及嵌入式系统来说是巨大的负担。

随着未来卫星有效载荷的处理规模越来越大，对基于软件定义的灵活性要求越来越高，星上处理可靠性将面临更大的挑战。针对这个趋势，星上容错设计应采取功能模块高效容错与系统级故障恢复相结合的技术路线。首先，为了降低总体容错开销，需针对每个功能模块的特点专门设计高效容错方法。例如，星上大规模数字波束成形是典型的并行滤波处理结构（输入相同，系数不同），可以引入若干冗余滤波支路，使其滤波系数为其他待保护滤波器的系数组合。基于滤波处理的线性特性，冗余支路与正常支路之间的线性关系可保持到多个输出之间，从而可以利用这个关系进行故障检测与恢复。已有工作表明，这种方案可以在保持模块可靠性的同时将容错开销降低至 1.2 模左右，相对于三模冗余方案降低 60% 以上。但是基于算法的加固设计通常只能暂时容错，无法在故障积累情况下

保证系统可靠性，因此需利用软件定义载荷的可重配置特性防止故障积累。由于周期逻辑刷新不能保证在刷新周期内的故障消除，需将容错设计与逻辑刷新相结合。容错设计保证模块在故障发生情况下输出正确结果，系统重配置模块在收到故障检测报告后进行故障恢复，从而最大限度地降低了故障恢复的开销。

星上容错设计未来可能有两个发展趋势，一是提高灵活性，二是提高智能性。首先，目前的高效电路级容错方案都是基于具体模块的特性而设计的，冗余开销固定不变，无法基于环境的恶劣程度进行适应性调整。未来软件定义载荷将具有细粒度的资源配置能力，可根据系统可靠性需求和空间辐照环境灵活配置容错方案，实现处理可靠性与资源有效性的优化配置。第二，现有容错方案都属于被动加固方式，且局限于单个模块，没有利用多模块之间的相互关系。未来卫星载荷将具有更强的智能性，可利用人工智能方法基于多个模块的状态和相互关系实现系统故障的快速诊断，并基于系统论和演化理论方法实现系统功能自愈。

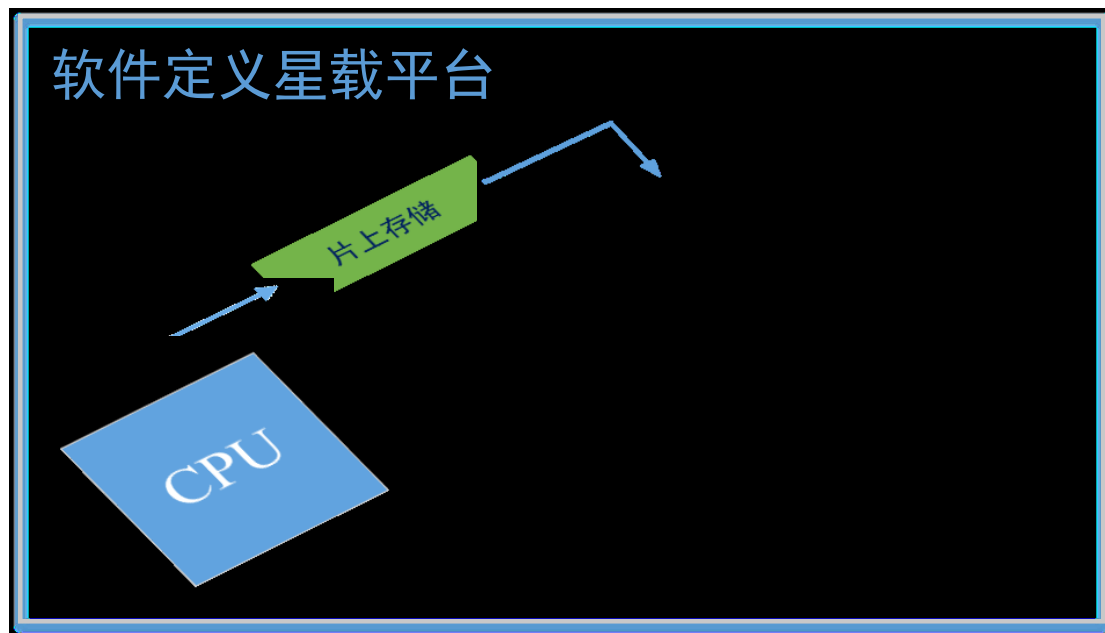


图 24 面向软件定义载荷的高效容错设计

5.4. 智能化融合化终端

5.4.1. 终端发展趋势

未来终端是连接物理世界与数字世界的桥梁，通过泛在连接，实现对物理世界的敏捷感知和精准控制。终端在物理世界能够触达的广度和深度，决定了未来世界数字化的水平。这既需要先进的智能手机和 AR/VR 终端，也需要汽车、机器

人、生产工厂大型设备中的终端模组，更需要大量能够安装到人体、衣物、建筑物、树木甚至是昆虫体内的微型终端。因此，未来通信终端将呈现出泛在化、智能化、多样化、芯片化等特征。

泛在化和智能化是空天地一体化终端的关键特征。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，实现全球无缝接入；智能化，是指终端具备人工智能的能力，通过随时随地的网络连接，空天地一体化终端与云端进行端云协作，借助于高性能的本地智能处理能力，能够满足用户的极致体验，实现广域的智能感知、智慧控制、智慧服务。



图 25 未来星地融合终端

根据系统的应用场景和业务特点，空天地一体化通信终端将主要分为提供全球无缝窄带语音/宽带互联网接入服务的个人业务终端、提供宽带接入服务的接入节点终端和为远程智能对象建立智能连接的物联网终端这三大类。与传统地面通信终端一样，空天地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。但是，空天地一体化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，这些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、定位精度等方面提出了更高的要求。根据不同的应用场景和业务特点，终端也将呈现出不同的能力特征。

5.4.2. 终端智能边缘计算

人工智能作为一种支撑技术，赋能各个产业。传统人工智能的能力通常都部署在云端，然而这种情况下智能化的能力会受限于网络传输时延和带宽的限制，同时在云端处理用户隐私相关数据的存储计算可能带来安全方面的问题。因此终端侧边缘计算将逐渐成为未来的发展趋势。

随着以深度学习为代表的机器学习在计算机视觉、图像处理、语音、自然语音处理等领域的突破，图片处理、图像识别、音频降噪、生物信息登录等终端应用逐渐普及。

相比于云端运行的人工智能，终端侧人工智能受到终端尺寸、能耗、处理能力和成本的制约，与云端平台的深度学习推理有着较大的区别，需要进行针对性的优化。另一方面，随着物联网技术的不断发展，移动终端需要集成传感、计算、通讯、AI 等多种功能。因此，当前的移动端除了配备高性能 CPU 外，大多都配备了性能更强劲的 GPU 以及 DSP 异构计算单元。

终端侧深度学习是机器学习中的一个研究方向，也是终端具有智能化能力的一个关键技术。目前，实现终端侧的智能化能力面临着以下两个问题：

（1）缺少开放的终端深度学习推理框架

移动芯片厂商提供的私有深度学习推理框架往往仅支持其自身的芯片。同时开发者很难对其进行定制，添加专有的算子。这大大限制了这些私有框架的使用范围，也增加了其部署的难度。

（2）开源深度学习框架未针对终端进行优化

目前，针对云端服务器端的场景，涌现了大量优秀的开源深度学习框架，但只有少部分开源深度学习框架，例如 TensorFlow Lite、NCNN 等，针对移动终端领域进行了专门的优化。但这些优化大多仅仅针对 ARM CPU，无法充分利用异构的计算资源，大大限制了计算效率。另外，受限于终端侧的能力，传统运行于云端的较为复杂深度学习架构以及人工智能算法也不适用于移动终端上。

针对这两个问题，设计能够充分利用终端芯片异构计算能力的开源深度学习框架和轻量化的边缘人工智能算法是非常有必要的。

开放式的计算框架是未来可能的一个技术发展方向。在终端上支持通用的深度学习模型，通过模型转换工具，将 TensorFlow、Caffe 和 ONNX 等目前常见的

模型格式转换成统一的终端通用计算模型格式后，再在终端上通过设备端通用计算框架运行。设备端通用计算框架将主要负责加速模型在设备上的运行速度，以及提供从服务端到设备端的转换，加密等。

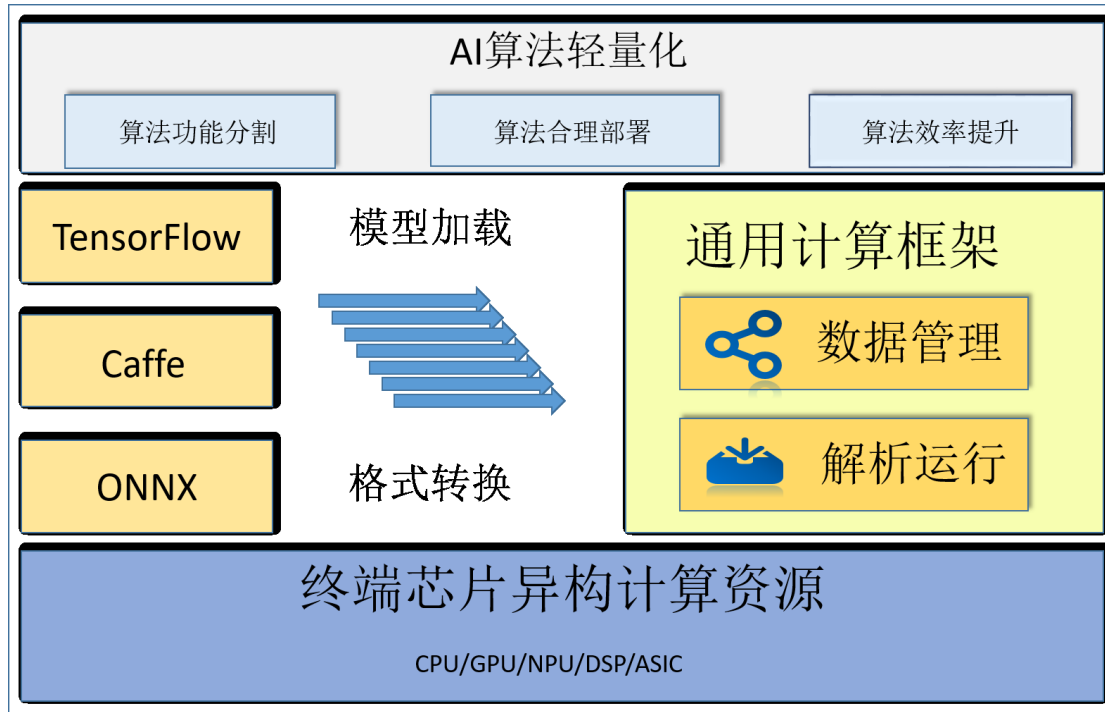


图 26 终端侧智能边缘计算框架

终端侧支持轻量化的 AI 算法有以下几个技术方向：

(1) 基于应用选择AI算法的部署

深度学习框架通常在云端实现训练和推理，只有对实时性要求很高的部分会交由终端进行处理。针对不同的应用需求，需要灵活地部署 AI 算法。

(2) 终端侧轻量化AI算法效率提升

算法效率的提升使得智能终端可以在同等的时间和消耗条件下提供更强大的能力。未来，AI 算法的设计需要适配终端不同的硬件能力，来实现整体算力的提升。

(3) 人工智能算法功能分割

将人工智能算法在终端和网络上进行分离，或者终端间协作是未来发展的一个技术方向。可以将计算密集型、能源密集型部分卸载到网络端点，而将隐私敏感和延迟敏感部分留在终端设备上。同时终端之间也可以通过协作来共同支持较为复杂的人工智能算法。

当然，支持开放式的计算架构和轻量化的人工智能算法也会面临着一些挑战，比如在支持开放式计算架构时不同模型的兼容性问题，支持轻量化人工智能算法带来的安全等方面的问题。

5.4.3. 终端低成本相控阵天线技术

相控阵天线是空天地一体化终端的主要天线形态。低成本的平板相控阵天线作为核心部件，对空天地一体化通信系统能否成功商业应用有直接影响。

终端相控阵天线的成本与芯片工艺技术密切相关。目前，相控阵技术在毫米波段使用的射频芯片主流是基于 GaAs 工艺、GaN 工艺的射频芯片，随着基于硅工艺的芯片逐渐进入毫米波频段，CMOS 工艺、SiGe 工艺和 SOI 工艺的相控阵射频芯片相继投入应用。

虽然 GaAs 工艺、GaN 工艺射频芯片发射效率和接收芯片噪声系数更为优良，但针对卫星通信终端这类民用市场而言，电性能指标一般的硅工艺芯片因其成本低、集成度高的特点而更具优势。硅基射频芯片目前采用的三种工艺优劣对比为：CMOS 工艺芯片具有最低成本和较差的性能指标，CMOS-SOI 工艺具有次低的成本，最好的发射效率，同时噪声系数较差，SiGe 工艺具有较高的成本，较好的噪声系数，发射效率适中。卫星通信应用中的天线口径较大，使用相控阵技术后，通道规模均在数千通道量级，因此通常选择 CMOS 工艺的射频芯片技术。

另外，硅基 CMOS 芯片的技术成熟度最好，可以利用目前的 65nm、45nm、28nm 工艺线，良品率很高，且生产线的产能巨大。同时，充分利用成熟的数字电路技术，除了可以将多个通道的接收、发射、移相衰减控制以及多个通道间的功分网络集成到一颗芯片内，还可以把串并转换电路、温控电路、功率检测电路、自检电路等数字控制部分一起集成，通过 RF SOC 封装，实现相控阵天线的高集成。因此，为了获得可大规模商用的低成本优势，硅基 CMOS 芯片技术目前是国际卫星相控阵天线领域的技术主流。

为了解决 CMOS 射频芯片相对于其他几类芯片的不足，如功率低、噪声系数高等，主要的技术路线有以下三个方向：

（1）毫米波工艺偏差控制技术

流片线通常会提供设计模型库，这些模型库往往是在较宽的频率经测试、建模和拟合后得到的，在工作频段往往存在一定的偏差。流片线对其工艺参数仅能

控制到一定的范围，这些偏差在毫米波频段的电性能产生较大影响。多通道 SOC 芯片类似建立在众多基本电路单元上的高层建筑，通过有效控制这些基本电路偏差的影响，获得多通道 SOC 芯片的性能。

（2） 宽带低噪声放大器实现技术

以最小噪声系数、带宽和增益为标准选取适合的晶体管；优化晶体管结构，使阻抗匹配点逼近于最佳噪声匹配点；采用中和电容技术，针对几个主要的寄生参数进行匹配网络优化，最大限度减小寄生参数的影响，拓展带宽。

（3） 芯片低成本封装技术

从射频性能来看，QFN 为代表的金丝键合加框架的封装方式，主要应用在一些低频和数字芯片领域，很难满足射频性能的需求。而 FCBGA 和 WLCSP 从插入损耗上来看都能满足需求，且隔离度和匹配性上看，FCBGA 和 WLCSP 相当。WLCSP 由于发展时间晚，其技术成熟度和 FCBGA 相比较，还有一定的差距，目前成本略高。因此，低成本封装技术主要以 FCBGA 和 WLCSP 为主。

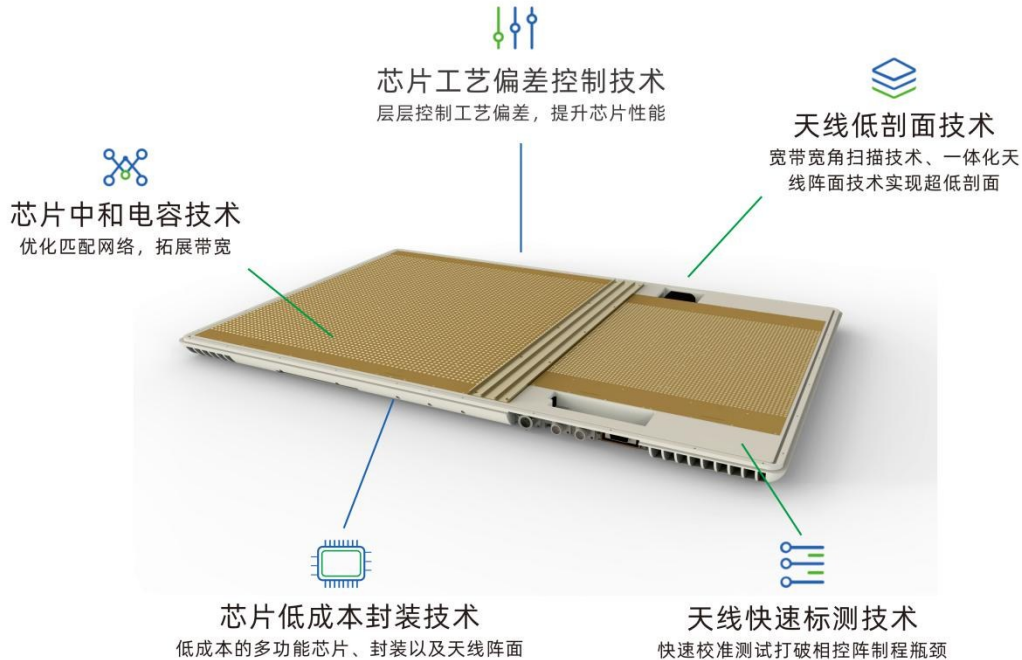


图 27 终端低成本相控阵天线

面向未来大规模生产，以 CMOS 工艺为基础的终端低成本相控阵天线技术还

需要解决芯片效率低、功率小以及噪声系数较大等难题。由于硅材料的电子迁移率低，导致采用 CMOS 工艺的芯片效率很难做高，目前毫米波频段国际领先水平单管芯达到了 20% 的效率，与 GaAs 通常 40% 的效率仍有较大差距；功率很难做大，目前可以做到单管芯 50mW 的水平，与 GaAs 通常 5W 的输出功率差距较大；噪声系数很难做小，现阶段达到的 3dB，与 GaAs 通常的 1.5dB 仍有差距。

5.5. 业务与应用技术

5.5.1. 空天地一体化融合业务

传统卫星通信主要提供卫星电视、卫星音频广播、移动卫星服务、军事通信、GPS 定位、气象预报等类型的业务，业务类型相对有限。随着 5G 网络商用，地面蜂窝通信系统可以支持更广泛的业务，包括移动互联网和物联网应用等，但相关业务在地面网络覆盖不到的地方难以获得服务或用户服务体验较差。构建统一空口和网络架构的空天地一体化网络，通过星地业务融合，可为用户提供统一业务支持与调度，实现用户随时随地无感知的接入网络、获得永远在线的通信服务，满足面向未来的万物智联与全球广域覆盖需求。

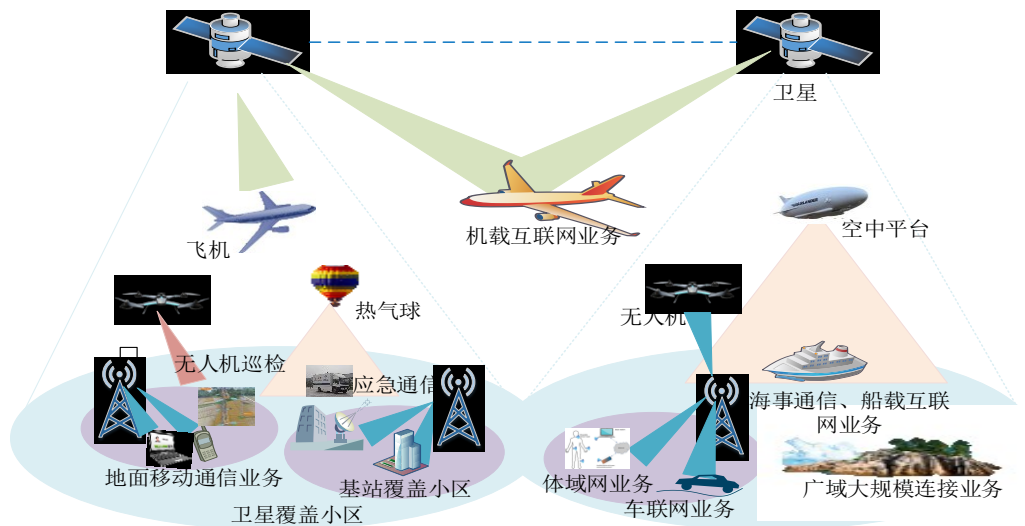


图 28 空天地一体化典型融合业务

空天地一体化网络具有覆盖范围广、可灵活部署、超低功耗、超高精度和不易受地面灾害影响等特点，在多种业务场景中都可以发挥重要作用。空天地一体化的典型业务如下：

(1) 广域大规模连接业务

对于环境监测、森林防火、无人机巡检、远洋集装箱信息收集等具有海量连接的通信业务场景，常出现在人烟稀少地区，且此类业务场景下的终端设备通常是各种类型的传感器，为了满足数据采集工作，常常需要部署密集的传感器节点。针对广域大规模连接业务可使用空天地一体化网络有效扩大覆盖范围，满足其更大连接、更低功耗的需求，且借助卫星或 HAPS/HIBS 等高空平台通信系统的灵活部署组网来突破地形地表限制进行数据传输，也可大大降低地面基站部署成本。

（2）工业互联网业务

卫星互联网业务通过将卫星通信与互联网业务融合，通过卫星为全球提供互联网接入服务。其中，工业互联网业务是空天地一体化系统最典型的融合业务，例如通过卫星的广域覆盖实现一张网络下的互操作，为海上航行、渔船作业等没有地面移动网络覆盖的远洋海域，提供全天候无缝覆盖的通信服务，更准确、低时延地掌握物流信息，提高运输效率；以及提供远洋船舶的实时监控、航运电子商务服务等。除了满足地面用户互联网接入，对于船载和机载互联网用户，还可以提供即时通信、邮件、网页浏览、多媒体娱乐等服务，满足用户各种应用需求。

（3）体域网业务

随着微观通信的发展，人体内外部署的传感器越来越多，在实时监控检测、远程会诊、人员行为管理等方面将发挥越来越重要的作用。在人类登山远行、远洋航行、军事行为、抢险救灾等位于偏远地区情况下，星地融合网络可为体域网业务提供网络服务，根据不同的体域业务类型，可选择不同的网络进行接入。比如针对在探险活动中发生的身体异常，可通过广覆盖的空天地一体化网络通知就近的医疗护理人员，并将大量的人体数字孪生数据同步给远程会诊的高级医疗人员等，通过卫星网络与地面网络的配合使用，大大提高传统体域网业务的应用范围。

（4）车联网业务

车联网业务是卫星与地面网络融合发展的热点业务。车联网业务要求在较大范围内可以实现高可靠、低时延的通信，要求远程驾驶端到端时延及智能运输系统、无线路测系统回传时延低，而通过灵活部署 HAPS 等高空平台就可以满足车联网对时延要求。利用空天地网络的广域覆盖性可以满足百 km 范围内车辆和路测系统的信息传输需求及实时通信。除此之外，卫星网络还可以辅助提供高精度

定位，产出拥有高精度地理信息和高精度时间信息的高精度 3D 地图，为车联网提供高精度导航。

5.5.2. 基于区块链的多方协作

空天地一体化通信系统中存在大量多方协作的场景，包括运营商之间的协作和终端之间的协作。运营商间的协作场景包括：某个区域覆盖不好或承载能力不足的运营商，需借助其他运营商的资源服务自己的用户；不同运营商深度融合系统服务，如卫星网承载控制面，地面运营商承载数据面，从而避免对高速移动终端服务过程中的频繁小区切换；不同通信运营商之间共享频谱、站址等资源，不同云/边缘计算运营商共享计算和存储资源等。终端之间的协作场景包括基于 D2D 的内容分享和协作传输，或者共享通信、计算和存储资源等。所有这些协作场景都面临两个核心问题，一是如何确定服务提供方或者资源分享方按照预定的“合同”提供了相应的服务或者资源，二是如何确定被协作方或者资源使用方按照预定规则完成了对协作方的支付。

现有的空天地一体化服务主要针对多模终端，一个终端属于不同运营商管理（如地面运营商、卫星运营商等），运营商之间不存在显性的协作服务问题。现有地面网络中，某个运营商的用户可能漫游到其他运营商的覆盖范围内，运营商之间的漫游服务协议可看作一种协作，基本流程如下。首先，运营商之间事先约定协作规则（收费标准、服务质量等）；第二，协作运营商对终端提供服务并计费，在服务结束后将计费结果发给终端归属运营商；第三，终端归属运营商向用户收费，并按照协作方的计费记录对协作方进行支付。这种协作方式的问题在于终端归属运营商无法判断协作运营商是否提供了相应质量的服务，而漫游地运营商也面临终端归属运营商拖欠服务费的问题。由于并没有双方都信任的第三方进行协调，协作各方都基于自我约束履行合同，并没有具有约束力的保障手段。而即使存在这样的一个第三方，又面临单点故障和信息滥用的风险。

为解决以上问题，可基于区块链技术提出多方协作服务和资源共享解决方案，具体技术路线如下。首先，基于区块链平台协作各方各自保存一份交易数据和服务提供证明，通过链式数据结构和多方共识机制保障数据不可篡改，为结算和服务质量评价提供可信依据；第二，基于数字签名和非对称加密技术确保数据的完整性和所属权，并在出现交易纷争的情况下作为证据，避免抵赖；第三，基于智

能合约固化预先商定的协作或交易规则，在满足交易条件的情况下自动完成相关动作（支付、罚款等），避免合同执行的纷争；第四，区块链保存所有用户的交易历史，使协作各方的行为追溯成为可能，从而有利于政府监管和用户信用评价。最终，由于区块链技术可以有效解决互信的问题，更多的运营商或者个人更愿意加入到多方协作服务和数据/资源共享中来，有利于激发更多丰富的协作和共享场景，大大提高各类服务质量、降低各种资源的利用效率。

未来的多方协作服务与资源共享将进一步朝着去中心化、智能化的方向发展。一方面，随着网络服务内容的不断丰富和网络切片、功能虚拟化的大规模应用，未来各类资源的分散程度将更高，协作服务方将更加多元，基于 P2P 的多方协作模式将更加普及。因此基于区块链的协作机制需承载更高频度的交易并发和更大规模的数据存储，并基于零知识证明、多方安全计算等技术解决更复杂的协作场景。另一方面，随着人工智能的快速发展，区块链中的智能合约也将真正具有智能，能够更高效地进行多元资源的对接和多方信誉度的评估，并基于大数据智能分析实现对协作行为状态监控和恶意行为预测，从而进一步提高多方协作系统的安全性。

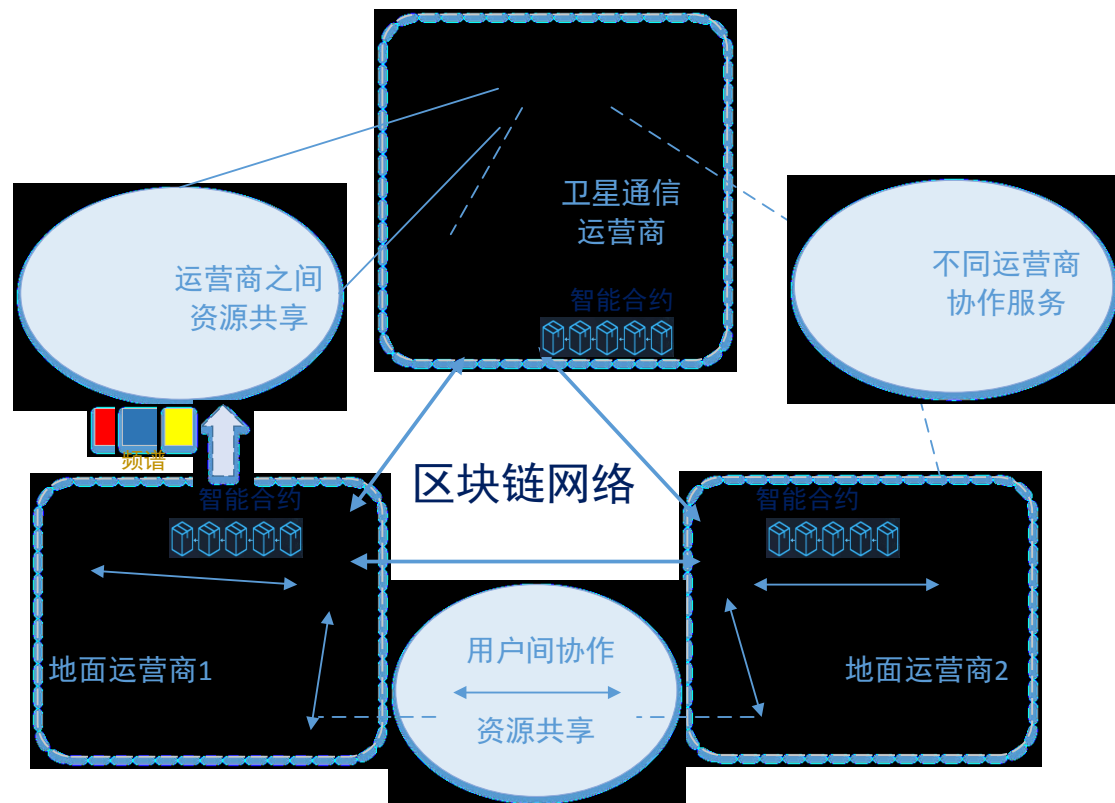


图 29 基于区块链的多方协作系统

5.5.3. 导航与通信融合

我国现已完成北斗三代导航系统的建设，解决了地球开阔空间的导航定位授时（PNT）问题，但仍存在落地信号弱、易被干扰、无法实现广域覆盖、高动态统一定位服务弱的问题，难以满足遮挡环境或室内定位的全面需求。为提供全覆盖、高精度、高安全、高智能的 PNT 服务能力，实现对美均势，亟需构建下一代导航系统。在空天地一体化背景下，下一代导航系统的建设将会逐步实现与通信系统的融合，为解决上述问题提供有效途径。

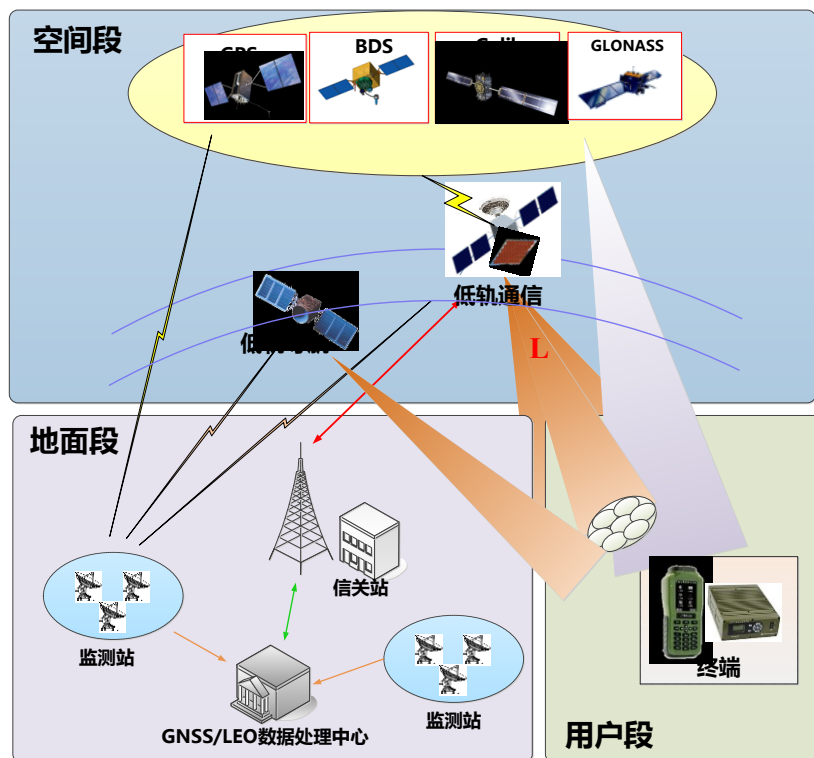


图 30 低轨星座导航增强系统

地面蜂窝网与导航系统空间网结合技术为系统级通导增强和赋能提供了新契机。目前以卫星空间网络为中心的导航系统和以地面蜂窝网络为中心的通信系统相对分立，在未来空天地一体化系统中，两系统可实现进一步耦合。利用地面基站的超高密度组网，作为导航卫星地基增强网络的延伸和补充，可提供地基增强时空位置服务；利用地面网络大带宽和低时延下行传输技术及基于无线 Mesh 网络的回传技术，可构建高精度的时空基准。此外，在空天地一体化网络中，利用地面通信网获取终端粗略位置和时间信息，利用通信信号和导航信号测量值进行混合定位，可提高定位可用性与鲁棒性。同时，基于地面蜂窝通信信号的 D2D

技术，利用终端之间的通信链路还可实现对导航盲区的增强。

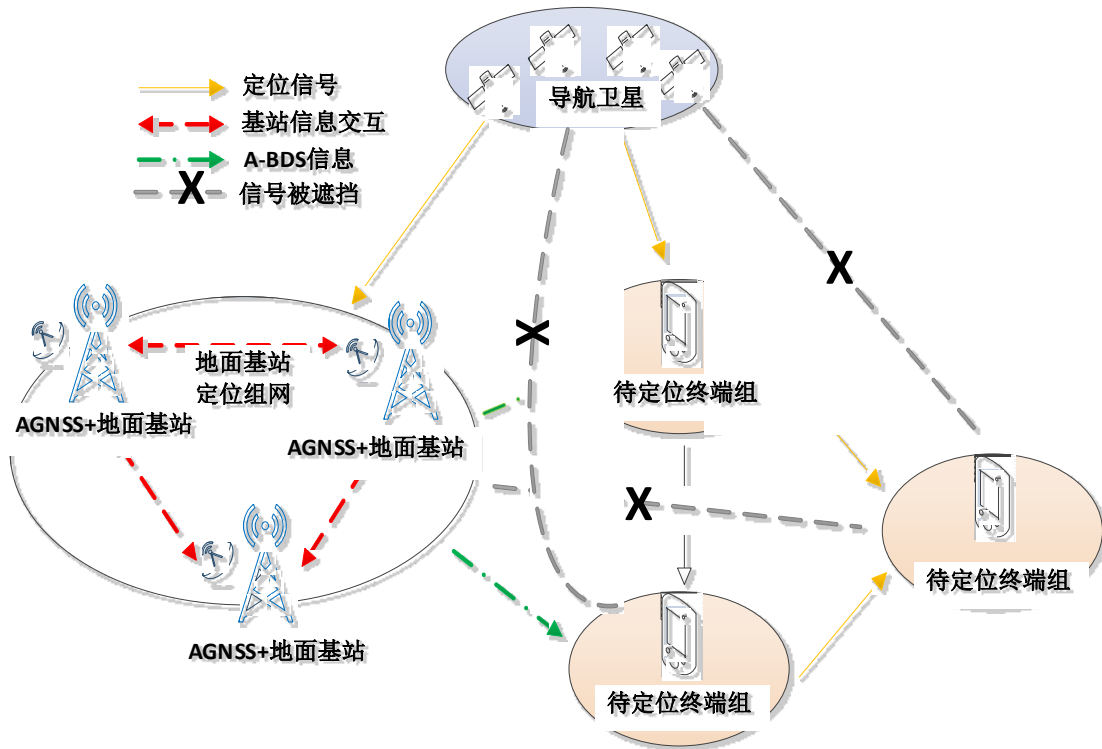


图 31 地面蜂窝网与导航卫星空间网联合定位

低轨星座导航增强技术有望成为下一代导航系统的新增量。低轨卫星轨道高度低、信号传输路径短、落地功率高，可改善遮挡条件下的定位效果，增强抗干扰能力，同时低轨卫星几何构型变化快，缩减了定位收敛时间，用户体验更优。目前存在通导系统分立、融合程度低的问题，通过低轨通信星座载荷搭载、通导一体化设计、建设低轨导航增强专用星座等手段，可实现精密单点定位、安全定位授时、天基监测、抗干扰定位等功能。该技术可能面临通导融合频段选取、时空基准传输、协议体制不一致等方面挑战。

6. 总结

空天地一体化是现代通信系统发展的必然结果，是 6G 区别于以往地面蜂窝通信系统的最重要特征。我们认为地面移动通信产业拥抱卫星通信产业的时机已经到来，实现高度融合和统一管控将使整个通信产业受益。为全球 76 亿人口提供无差别的高速通信网络是全球通信产业共同努力的目标。

这本白皮书分享了我国通信产业对于空天地一体化通信系统的思考，包括发展愿景、网络能力需求、面临的挑战、立体网络融合架构以及潜在的关键技术等。

知识共享，启示未来。

参考文献

- [1] 方敏, 6G 技术挑战、创新与展望, 中兴通讯技术, 2020 年 6 月.
- [2] 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 年 6 月.
- [3] Shanzhi Chen, Shaohui Sun, Shaoli Kang, "System Integration of Terrestrial mobile communication and Satellite communication", to be appeared in China Communication, December 2020.
- [4] X. Luo et al., "A Scalable Ka-Band 1024-Element Transmit Dual-Circularly-Polarized Planar Phased Array for SATCOM Application," in IEEE Access, vol. 8, pp. 156084-156095, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019174.
- [5] B. Sadhu, X. Gu and A. Valdes-Garcia, "The More (Antennas), the Merrier: A Survey of Silicon-Based mm-Wave Phased Arrays Using Multi-IC Scaling," in IEEE Microwave Magazine, vol. 20, no. 12, pp. 32-50, Dec. 2019, doi: 10.1109/MMM.2019.2941632.
- [6] 朱立东, 吴廷勇, 卓永宁. 卫星通信导论 (第 4 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [7] H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013, pp. 332-336.
- [8] J. Dai, K. Niu and J. Lin, "Iterative Gaussian-Approximated Message Passing Receiver for MIMO-SCMA System," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 13, no. 3, pp. 753-765, June 2019.
- [9] K. Au et al., "Uplink contention based SCMA for 5G radio access," 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, TX, 2014, pp. 900-905.
- [10] A. Bayesteh, E. Yi, H. Nikopour and H. Baligh, "Blind detection of SCMA for uplink grant-free multiple-access," 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Barcelona, 2014, pp. 853-857.
- [11] 邵宣博. 非正交多址关键技术研究[D]. 北京邮电大学, 2019.
- [12] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh and H. Baligh, "SCMA Codebook Design," 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Vancouver, BC, 2014, pp. 1-5.
- [13] H. Nikopour et al., "SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks," 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, 2014,

- pp. 3940–3945.
- [14] S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He and Y. Chen, "Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems," 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, 2014, pp. 4782–4787.
- [15] 张晗. 稀疏码多址系统低复杂度检测研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.
- [16] 王林方. 星地链路稀疏码多址接入低复杂度检测算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [17] J. Bao, Z. Ma, M. Xiao, T. A. Tsiftsis and Z. Zhu, "Performance analysis of uplink sparse code multiple access with iterative multiuser receiver," 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 2017, pp. 1–6.
- [18] W. B. Ameer, P. Mary, M. Dumay, J. Héland and J. Schwoerer, "Performance study of MPA, Log-MPA and MAX-Log-MPA for an uplink SCMA scenario," 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT), Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 411–416.
- [19] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh and H. Baligh, "SCMA Codebook Design," 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Vancouver, BC, 2014, pp. 1–5.
- [20] Q. Wang, T. Li, R. Feng and C. Yang, "An Efficient Large Resource-User Scale SCMA Codebook Design Method," in IEEE Communications Letters, vol. 23, no. 10, pp. 1787–1790, Oct. 2019.
- [21] L. Yu, P. Fan, D. Cai and Z. Ma, "Design and Analysis of SCMA Codebook Based on Star-QAM Signaling Constellations," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 11, pp. 10543–10553, Nov. 2018.
- [22] X. Zhang, G. Han, D. Zhang and L. Yang, "A Lattice-Based SCMA Codebook Design for IoMT Communications," 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops), Changchun, China, 2019, pp. 169–173.
- [23] 田立宁. SCMA 码本设计与检测技术研究[D]. 浙江大学, 2018.
- [24] 孙俊伟. 上行 SCMA 系统中的免授权机制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [25] K. Au et al., "Uplink contention based SCMA for 5G radio access," 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, TX, 2014, pp. 900–905.
- [26] 裴郁杉, 张忠皓, 王婷婷. 空天地一体化通信网络发展愿景与挑战[J]. 邮电设计技术, 2020(04):15–20.
- [27] 李凤华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势

- [J]. 通信学报, 2016, 37(11): 156-168.
- [28] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
- [29] Fettweis G, Krondorf M, Bittner S. GFDM-generalized frequency division multiplexing[C]//VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference. IEEE, 2009: 1-4.
- [30] Michailow N, Matthé M, Gaspar I S, et al. Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(9): 3045-3061.
- [31] Michailow N, Krone S, Lentmaier M, et al. Bit error rate performance of generalized frequency division multiplexing[C]//2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). IEEE, 2012: 1-5.
- [32] Yin L, Ni Q, Deng Z. A GNSS/5G integrated positioning methodology in D2D communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 351-362.
- [33] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma, and V. Kalyanaraman, "Blockchain technology: Beyond bitcoin," Appl. Innov., vol. 2, nos. 610, p. 71, Jun. 2016.
- [34] G. Zyskind, O. Nathan, and A. S. Pentland, "Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data," in Proc. IEEE Secur. Privacy Workshops, May 2015, pp. 180-184.
- [35] M. Iansiti and K. R. Lakhani, "The truth about blockchain," Harvard Bus. Rev., vol. 95, no. 1, pp. 118-127, Jan. 2017.
- [36] F. Siegle, T. Vladimirova, J. Ilstad, and O. Emam, "Availability analysis for satellite data processing systems based on SRAM FPGAs," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 52, no. 3, pp. 977-989, Jun. 2016.
- [37] F. L. Kastensmidt, L. Carro, and R. Reis, Fault-Tolerance Techniques for SRAM-Based FPGAs. New Haven, CT, USA: Springer 2006.
- [38] 李龙龙, 耿国桐, 李作虎. 国外卫星导航系统星间链路发展研究[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(002): 133-138.

- [39] 杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展[J]. 应用光学, 2018, 39(1):12-21.
- [40] Boroson D M, Robinson B S, Burianek D A, et al. Overview and status of the Lunar Laser Communications Demonstration. Proc. SPIE, 2012, 8246: 82460C.
- [41] 蒋立正. IPoverCCSDS 空间组网通信关键技术研究[J]. 2009.
- [42] 工业和信息化部. 卫星频率轨道资源研究与规划. 2013.
- [43] James P , Lowdell J , Potter S V , et al. Design of a multiport amplifier beam forming network for a mobile communications antenna[C]// European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2008.
- [44] Tomei B , Koduru C , Sichi S , et al. Advanced Space Based Network using Ground Based Beam Former[C]// Aiaa International Communications Satellite Systems Conference. 2011.
- [45] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 022(002):144-152.

致谢

历时半年，这本白皮书在 19 家单位的共同努力下终于完成了。

牵头撰写这本白皮书让我感受到了前所未有的感激之情。

虽然我很感激，但是却找不到适当的方法来表达。首先我想要感谢我的领导潘振岗博士，强调抓住事物的本质，指导我梳理复杂系统的逻辑。感谢我的师兄陈翔博士，第一个报名参与本白皮书的撰写，让我备受鼓舞，更要感激他极致严谨的治学态度，时刻提醒我注重白皮书的每个细节。感谢中兴朱清华团队的鼎力支持，勇担重任，詹亚军架构师对核心网技术的执着使人感动，在世界 6G 大会场下，谢峰博士深入浅出地介绍星地融合组网的接入网技术让我受益匪浅。感谢航天五院团队，丁睿博士主动承担多个章节的牵头撰写工作，展现了航天人的担当。感谢北京邮电大学王珂博士，妙笔生花，润色升华关键篇章。感谢小米团队朱亚军，组织多家单位共同讨论终端发展趋势和关键技术。对撰写团队所有成员的感激之情，难以一一详述。总之，感谢撰写团队的精诚合作，没有大家的共同努力，就没有这本白皮书。

编辑员：李忻

贡献者：

紫光展锐（上海）科技有限公司：李忻、潘振岗

中山大学：陈翔、郑斯辉

中兴通讯股份有限公司：詹亚军、田开波、谢峰、朱清华、郭勇

中国空间技术研究院：丁睿、郝媛媛、缪中宇、刘亮、袁俊、孙博、秦兆涛

北京邮电大学：邓中亮、王珂、林文亮、刘浩、于晓艺

北京小米移动软件有限公司：朱亚军、池连刚、李明菊

天津大学：高镇

中国移动通信有限公司：王爱玲、王硕

中国电信集团有限公司：李路鹏、梁健生、吕振华

中国联合网络通信有限公司：裴郁杉、刘秋妍、王婷婷

大唐移动通信设备有限公司：康绍莉、韩波、秦海超

成都天锐星通科技有限公司：张驰、赵国华、和历阳

电子科技大学：朱立东、桂毅恒、刘轶伦、蒋怡婷

西安空间无线电技术研究所：方海

东南大学：曾勇、徐晓莉

三星通信研究院：孙程君、吴越、金亦然

北京中科晶上科技股份有限公司：苏泳涛、戴西华

北京信息科技大学：徐湛、田露

现代测控技术教育部重点实验室编制人员：职如昕



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM