

未来网络技术发展系列白皮书(2026)

卫星互联网 承载网技术白皮书V2.0



紫金山实验室、北京邮电大学

版权声明

本白皮书版权属于紫金山实验室及其合作单位所有并受法律保护，任何个人或是组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明“**来源：紫金山实验室等**”。否则将可能违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此紫金山实验室有权追究侵权者的相关法律责任。

编写说明

主要编写单位：

紫金山实验室

北京邮电大学

主要编写人员：

刘韵洁、黄韬、刘江、潘恬、张然、王颖、周宇柯、马兴睿、查玄阅、蒙延龙、王春龙、朱士伟、王楚楠、赵喜凤

前 言

随着 5G/6G、人工智能、商业航天和星地融合网络等技术与产业加速发展，卫星互联网正向全球覆盖、天地协同和多业务融合的新型信息基础设施演进。地面光纤和移动通信网络在城市及人口密集区域已形成较强的覆盖与服务能力，但在海洋、航空、极地、沙漠、边远地区以及自然灾害造成地面网络中断的场景中，仍难以持续提供广域连接。与此同时，跨境物流、远洋航运、低空运行、能源矿区、应急救援和手机直连卫星等新需求不断涌现，推动卫星通信由面向专用终端的补充通信手段，逐步转变为面向公众和行业用户的新型网络基础设施。全球主要经济体和科技企业持续加大卫星互联网投入，Starlink 加快推进全球化运营、星间激光组网和手机直连卫星业务，Amazon 宣布对其低轨卫星宽带项目投入超过 100 亿美元，全球卫星互联网竞争已由单项技术和星座部署竞争，延伸至网络能力、产业生态、标准规则和全球运营能力的综合竞争。

我国卫星互联网也正在由战略布局和技术验证迈入规模建设与应用拓展阶段。2024 年政府工作报告将商业航天列为新的增长引擎，国家航天局发布《商业航天高质量发展安全发展行动计划（2025—2027 年）》，进一步提出将商业航天纳入国家航天发展总体布局，完善产业投融资机制，推动社会资本参与商业航天建设。资本投入和工程部署同步提速，2024 年垣信卫星完成 67 亿元 A 轮融资，用于卫星星座建设、技术研发和市场拓展；截至 2026 年 9 月，千帆星座累计发射

卫星已达 256 颗，国内低轨卫星互联网进入百星级组网和批量化部署阶段。政策引导、资本投入、卫星批产、密集发射和应用需求相互叠加，表明我国卫星互联网正在从“项目建设”向“网络建设和规模运营”加速转变。

然而，卫星数量增加并不等同于网络服务能力形成。卫星制造和发射主要解决“有星可用、具备覆盖”的问题，而如何将高速运动的卫星、频繁变化的星间链路、分布式信关站、地面骨干网、移动通信网、云平台以及海量用户终端连接为统一网络，决定了卫星互联网能否真正实现“有网可组、业务可承载、服务可保障”。随着星座规模由几十颗、百颗向千颗乃至万颗扩展，网络面临高动态拓扑、星间链路频繁切换、流量分布不均、路由状态快速变化以及跨域协同复杂等问题；手机直连卫星、航空海事通信和行业专网等业务的发展，又进一步提出海量连接、差异化服务质量、突发流量疏导、端到端安全和连续服务保障等要求。卫星互联网的能力瓶颈，正在由单星性能和单链路速率逐步转向体系化的组网、承载、管控与运营能力。

卫星互联网承载网正是解决上述问题的关键基础设施。它贯通卫星接入网络、星间骨干网络、地面信关站以及地面核心网和骨干网，承担业务流量汇聚、交换转发、动态路由、资源调度、跨域互联和安全保障等功能，是将卫星覆盖能力转化为端到端服务能力的“太空信息高速公路”。与传统卫星通信系统相比，卫星互联网承载网不仅需要适应高速移动节点、高动态拓扑和复杂空间链路，还需要在轨道频谱资源受限、星上计算存储能力有限和天地网络体制存在差异的条件

下，支撑海量终端、多类型业务和全球范围的连续服务。因此，研究卫星互联网承载网的体系架构、关键技术、产业基础、标准规范和演进方向，是推动我国卫星互联网由“建星座、通链路”向“组网络、强服务、可运营”转变的迫切需要，也是提升空天地一体化网络自主可控能力和全球服务能力的重要基础。

本白皮书围绕卫星互联网承载网的发展需求与能力愿景、体系架构、关键技术、产业生态、标准化进展、应用服务、关键挑战和发展趋势展开系统研究。在体系架构方面，分析卫星互联网承载网的组成、功能及其由传统通信卫星系统向多轨协同网络演进的过程，对集中式、分布式和混合式三种典型架构进行比较。在关键技术方面，围绕星间与星地高速链路、星上交换转发、高动态路由与移动切换、网络管控与资源编排、网络感知与数字孪生、安全可信保障以及测试验证等内容，梳理其技术内涵、实现机制、适用条件和发展方向。

在产业与标准方面，本白皮书从核心芯片与基础器件、星载承载网设备、星地融合承载设备、网络系统与管控平台、协议与软件生态、测试验证以及运营服务七个板块出发，构建涵盖上游基础能力、中游系统装备和下游运营应用的产业体系，并结合国内外主要星座的组网进展、服务布局和运营模式分析市场格局。同时，梳理 3GPP、IETF、ITU、CCSA 和 SAC/TC425 等组织的标准化进展，分析不同标准体系之间的衔接关系、现有空白和后续推进重点。在此基础上，研究轨道频谱资源、复杂空间环境、安全风险、端到端服务质量、超大规模星座管控以及海量终端直连等关键挑战，对星地融合、高速光网络、弹

性承载、多轨协同、智能自治以及安全开放等发展方向进行研判。

本白皮书期望为卫星互联网承载网的技术研究、系统建设、产业规划、工程验证和标准制定提供参考，促进航天、通信、计算、安全和行业应用等领域的协同创新，加快关键芯片、星载网络设备、星地融合网关、管控平台和协议软件等核心环节的自主突破。通过汇聚产业界、学术界和应用单位力量，逐步形成架构体系完整、关键技术自主、产业链条协同、标准接口开放、运营服务可持续的卫星互联网承载能力，为构建天地协同的信息基础设施、提升国家网络韧性、服务数字中国和“一带一路”建设提供有力支撑。

除此之外，需要说明的是《卫星互联网承载网技术白皮书 V1.0》主要围绕卫星互联网承载网的发展需求、典型应用场景、集中式、分布式和混合式架构，以及星间链路、路由交换、移动切换和网络管理等基础技术，初步构建了卫星互联网承载网的技术框架。《卫星互联网承载网技术白皮书 V2.0》在 V1.0 基础上，进一步明确卫星互联网承载网的概念内涵、体系边界和星地协同关系，完善场景需求与能力愿景之间的映射，补充三类架构的性能比较与适用条件，扩展安全可信、数字孪生和测试验证等关键技术，并从核心器件、星载设备、星地融合设备、网络管控、协议软件、测试验证和运营服务等方面构建产业体系。同时，V2.0 结合超大规模星座、手机直连卫星、星间光网络、通算智融合以及 3GPP Release 19 等最新进展，对标准化、关键挑战和未来演进方向进行了更新。

目 录

前 言	I
目 录	V
一、发展需求、应用场景与能力愿景	1
1.1 卫星互联网承载网发展需求	1
1.2 典型业务场景与承载需求	4
1.3 卫星互联网承载网能力愿景	15
二、卫星互联网承载网体系架构	20
2.1 集中式架构	22
2.2 分布式架构	23
2.3 混合式架构	25
三、卫星互联网承载网关键技术	30
3.1 星间/星地高速链路与传输技术	30
3.2 星上交换与转发技术	39
3.3 高动态网络路由技术	42
3.4 高动态移动切换技术	44
3.5 网络管控与异构资源编排技术	47
3.6 网络感知、建模与数字孪生技术	52
3.7 承载网安全与可信保障技术	54
3.8 测试验证与性能评估技术	57

四、卫星互联网承载网产业体系与发展	61
4.1 核心芯片与关键器件	61
4.2 星载承载网设备	64
4.3 星地融合承载设备	69
4.4 卫星网络系统与管控平台	76
4.5 承载网协议与基础软件	82
4.6 测试仪表、仿真与验证	86
4.7 网络运营与行业服务	92
五、卫星互联网承载网标准化进展	111
5.1 3GPP 标准化进展	111
5.2 IETF 标准化进展	113
5.3 ITU 标准化进展	114
5.4 CCSA 标准化进展	116
5.5 其他组织与行业标准进展	118
5.6 标准协同关系、空白与推进建议	122
六、卫星互联网承载网关键挑战	127
6.1 轨道与频谱资源约束下的规模化挑战	127
6.2 复杂空间环境下的链路可靠性挑战	128
6.3 卫星互联网安全风险的级联防护挑战	129
6.4 星地融合条件下的端到端 QoS 保障挑战	134
6.5 超大规模星座的路由与管控复杂度挑战	135
6.6 海量终端直连的业务承载挑战	138

七、卫星互联网承载网发展趋势	142
7.1 星地融合与泛在互联演进	142
7.2 高速光网络与弹性承载演进	144
7.3 多轨协同与网络韧性演进	146
7.4 通算智融合与智能自治演进	147
7.5 安全开放与自主可控演进	149
八、总结与展望	153
附录 A：术语与缩略语	156
参考文献	159

一、发展需求、应用场景与能力愿景

卫星互联网承载网的发展既受到国家战略、产业升级、民生服务和全球科技竞争等多重需求驱动，也需要面向国内、“一带一路”沿线及全球不同覆盖区域、服务密度和业务特征形成差异化的承载能力。本章按照“发展需求—应用场景—能力愿景”的逻辑，分析卫星互联网承载网建设的主要驱动力，梳理通信增强、应急保障、产业赋能和科学研究等典型应用场景，并在此基础上归纳其在泛在覆盖、高速承载、连续可靠、智能管控和安全可信等方面的能力愿景，为后续体系架构设计与关键技术研究提供需求牵引。

1.1 卫星互联网承载网发展需求

卫星互联网承载网是贯通在轨星座、地面信关站与地面核心网络，承载星间、星地及地面骨干业务流量的关键基础设施，其建设水平直接影响卫星互联网的覆盖范围、传输效率、服务连续性和安全可控能力。本节围绕国家战略与安全韧性、产业数字化与商业航天发展、民生服务与普惠连接以及全球科技与标准竞争四个方面，分析卫星互联网承载网建设面临的现实需求及其重要价值。

1.1.1 国家战略与安全韧性需求

随着我国综合国力的不断提升，在经济、安全、外交等多领域对

信息技术的依赖程度日益加深，数字化转型成为国家发展的核心任务之一。卫星互联网承载网作为新一代信息技术的重要基础设施，其重要性日益显著，我国也在大力推动卫星互联网承载网基础设施的建设和布局。国家对卫星互联网承载网的战略需求聚焦于数字边疆守护、应急通信保障及“一带一路”互联互通三大场景。在数字边疆守护中，我国通过天基与地面融合网络实现边境地区通信覆盖，如新疆 34 个边境县城 5G 和千兆光网覆盖、西藏阿里地区中星 16 号高通量卫星提供 20Gbps 通信容量，构筑“数字国界”的天基防线。应急通信保障方面，卫星互联网承载网在灾害中发挥关键作用，2023 年甘肃积石山地震中，通过便携站部署与星上资源调度，保障了 72 小时黄金救援期的指挥链路畅通。“一带一路”建设中，承载网为沿线国家提供跨境电商、远程医疗等服务支撑，促进区域信息共享与经济联动。

1.1.2 产业数字化与商业航天发展需求

卫星互联网承载网正以“空天地一体化”架构重构产业生态，深度融入国家“东数西算”与“算网能一体化”战略布局。通过卫星制造、火箭发射、激光通信等核心技术的跨域协同，天基节点正成为绿色算力网络的空间支点，驱动海洋经济、跨境贸易等产业向智能化、低碳化跃迁，为区域经济联动注入新动能。产业链协同推动卫星制造与火箭技术突破，如蓝箭航天完成火箭垂直起降回收验证，银河航天发射 48Gbps 低轨宽带通信卫星，构建星地融合 5G 试验网络。海洋经济领域，海卫通以“卫星+5G+AI”构建船岸云平台，提升船舶智能

化水平。青岛“星海互联”项目建设低轨卫星互联网海洋数据枢纽，推动海洋产业升级。跨境经济中，低轨卫星互联网改善“一带一路”国家通信条件，洲际航天与阿拉伯信息通讯组织合作的 6000 颗卫星星座计划，将实现手机直连卫星大规模商用，弥合数字鸿沟。

1.1.3 民生服务与普惠连接需求

卫星互联网承载网正突破传统地面网络覆盖极限，将数字服务延伸至山川、海洋、荒漠等物理空间末梢，在乡村振兴、民生应急、大众消费三大领域重塑服务可及性。乡村振兴中，卫星互联网承载网赋能智慧农业，新疆棉田通过智能灌溉系统节水 30%、增产 15%。云南偏远山村电商销售额增长 200%，农民收入显著提升。生态环保领域，承载网支撑三江源国家公园生态监测、长江经济带水污染防控，实现全域动态监管。大众消费场景中，无人机配送时效提升 50%，低空旅游与户外探险通过卫星通信保障安全，遇险救援响应时间缩至 15 分钟内。

1.1.4 全球科技与标准竞争需求

卫星互联网承载网正成为大国科技博弈的制高点。据国际电信联盟（ITU）预测，2028 年全球天基网络市场规模将突破 4200 亿美元，而核心技术标准主导权将决定未来产业生态格局。我国在星地协同协议架构中占据主导地位，3GPP Release-19 吸纳“星间协同 Xn 接口增强方案”。技术突破方面，清华大学“智慧天网一号 01 星”实现中

轨星间激光通信 120Gbps 稳定传输，之江实验室“三体计算星座”构建星上算力网络，提升应急响应效率。全球合作中，“天基丝路”平台为中老铁路、瓜达尔港提供服务，技术模式被纳入联合国《空间 2030 议程》。

1.2 典型业务场景与承载需求

卫星互联网承载网的应用价值与覆盖区域的服务密度、地面网络基础条件及业务连续性要求密切相关。本节选取通信增强、应急保障、产业赋能和科学研究等典型业务场景，重点分析不同覆盖区域、用户规模、业务类型和服务保障要求下的业务特征及其对卫星互联网承载网的能力需求。

1.2.1 通信增强类应用场景

卫星互联网通过突破地表物理限制，构建无缝覆盖的立体网络，显著提升传统地面网络难以服务的区域（如偏远陆地、远洋、航空航线）的连接能力。其核心价值在于以经济可行的方式实现全球范围的高质量通信覆盖，尤其适用于地广人稀、基建薄弱的区域。

1.2.1.1 偏远地区通信覆盖

在新疆、西藏、青海等地形复杂区域，传统光纤基站建设成本高昂，且维护困难。低轨卫星星座凭借低时延和高带宽能力，成为经济高效的解决方案。例如，在青藏高原牧区，可通过低轨卫星星座为牧

民提供 4G/5G 级移动通信服务，支持视频通话、在线教育及农产品电商直播。在塔克拉玛干沙漠边缘，为石油勘探队提供实时数据回传通道，实现与总部的无缝联络。此类场景将覆盖全国的陆地和海洋网络通信盲区，惠及超千万人口，并带动远程教育、智慧牧业等衍生应用。我国低轨卫星互联网星座建设正加快推进，中国星网“GW 星座”和垣信“千帆星座”等持续开展组网部署。2026 年 10 月 10 日，卫星互联网低轨 27 组卫星成功发射，星座建设持续推进；据工业和信息化部 2026 年 9 月公布的信息，千帆星座已累计发射 256 颗卫星。随着组网规模扩大，卫星互联网对星间互联、星地汇聚、动态路由和业务连续承载的需求进一步增强

1.2.1.2 航空机载通信服务

传统航空通信依赖 L 波段海事卫星或空对地网络，存在带宽窄、资费高的痛点。新一代 Ka/Ku 频段低轨卫星可为民航客机提供 200Mbps 以上带宽，时延控制在 50ms 以内。卡塔尔航空的波音 777 飞机搭载 Starlink 卫星网络服务，2024 年实测显示单机峰值速率达 350Mbps，无论是观看流媒体、在线游戏，还是高效办公，乘客都可享受媲美乃至优于家庭宽带的快速可靠连接体验。美国联合航空也在飞机上部署了 Starlink 服务，并计划在 2025 年内持续扩展到更多机型。传统机上网络中每架飞机的整体带宽约为 3Mbps，下载速度 500 至 600Kbps，安装 Starlink 后机上 WIFI 最高可达 250Mbps，远高于传统机上网络服务。

1.2.1.3 远洋船舶全域联网

全球约 90% 的远洋船舶长期面临通信中断率高、数据传输成本大的挑战。低轨卫星星座通过激光星间链路构建太空骨干网，结合船舶上部署的通信终端，实现全球海域稳定覆盖，如图 1-1 所示。从 2022 年起，Starlink 开始全面进军邮轮行业。皇家加勒比邮轮公司是最早宣布全面部署 Starlink 的公司，旗下所有邮轮、包括未来新建的邮轮都将使用星链服务，乘客可流畅进行 4K 视频直播，邮轮娱乐系统带宽保障可达 350Mbps。山东“智慧渔港”体系中，借助先进的传感器技术和卫星定位及通信系统，渔船的实时位置、航行速度、航向等关键信息被精准捕捉并实时传输至指挥中心。即便在夜晚或是浓雾弥漫的海面，监管人员也能通过系统清晰掌握每一艘渔船的动态，真正做到了全天候、无死角的监管。曾经那些因监管盲区而发生的渔船碰撞、非法越界捕捞等事件，如今已大幅减少，海上航行安全得到了前所未有的保障。

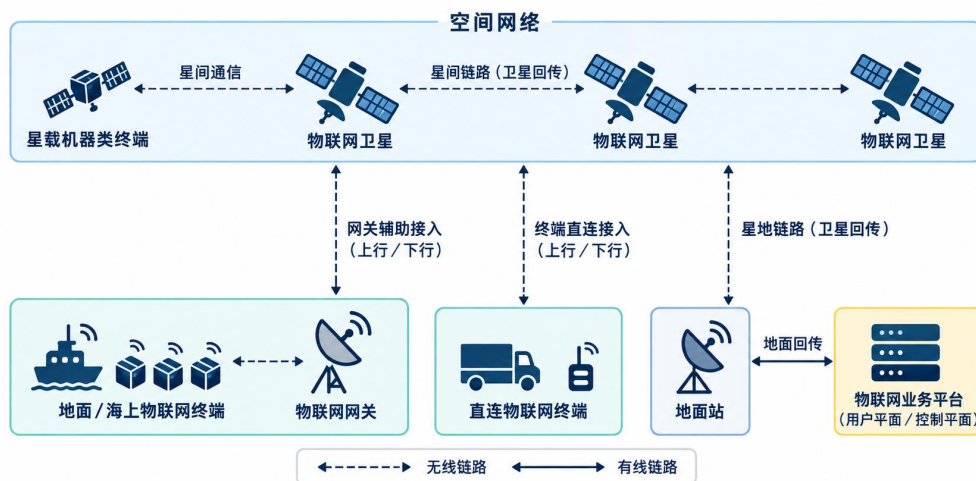


图 1-1 远洋船舶全域联网架构

1.2.1.4 手机直连卫星通信

Starlink 手机直连卫星（Direct to Cell, DTC）通过搭载星载 LTE 基站（eNodeB），使兼容的普通 LTE 手机在卫星覆盖及运营商服务支持条件下直接接入卫星网络。其星载载荷具备基站处理功能，不能简单等同于透明射频转发器。该业务将卫星网络的服务对象由专用终端拓展至普通移动终端，但覆盖范围内的用户数量不等于同时传输的用户数量，实际并发服务能力受到可用频谱、波束资源、业务类型及单用户速率等因素约束。对承载网而言，终端直连业务需要重点保障接入流量汇聚、突发负荷承载、移动切换期间的服务连续性，以及在地面移动通信网的业务衔接。

1.2.2 应急保障类应用场景

卫星互联网在极端环境与关键任务中构建高可靠通信链路，成为国家应急管理体系的核心基础设施。其价值体现在快速部署、抗毁性强及广域覆盖三大特性，为灾害救援、公共安全提供“不断线的生命通道”。

1.2.2.1 灾害应急通信响应

卫星互联网在灾害应急通信中发挥不可替代的“神经中枢”作用，尤其在极端天气导致地面通信瘫痪的场景下，如图 1-2 所示。2025 年 7 月，陕西省洛南县在易受灾区域建成 25 个卫星通信节点，通过室

外天线部署形成网络化应急通信体系，确保在汛期“断网、断电、断路”情况下指挥指令的实时传递，提升县域灾害防控效能。同步地，中国电信在 2025 年北京暴雨灾害中紧急投入 2 辆卫星通信车、6 部卫星背包站及 15 部卫星电话，使密云、怀柔、延庆等光缆损毁区域实现卫星通联，保障了 43 个断网基站的行政村灾情上报与救援调度。问界 M9 在青海德令哈无人区实现救援突破，当车辆爆胎且地面网络完全中断时，车主通过车载卫星通信 eCall 功能一键求助，救援团队依托卫星语音通话 61 分钟精确定位，历经 3.5 小时穿越无人区完成救援，成为行业首例车载卫星救援成功案例。

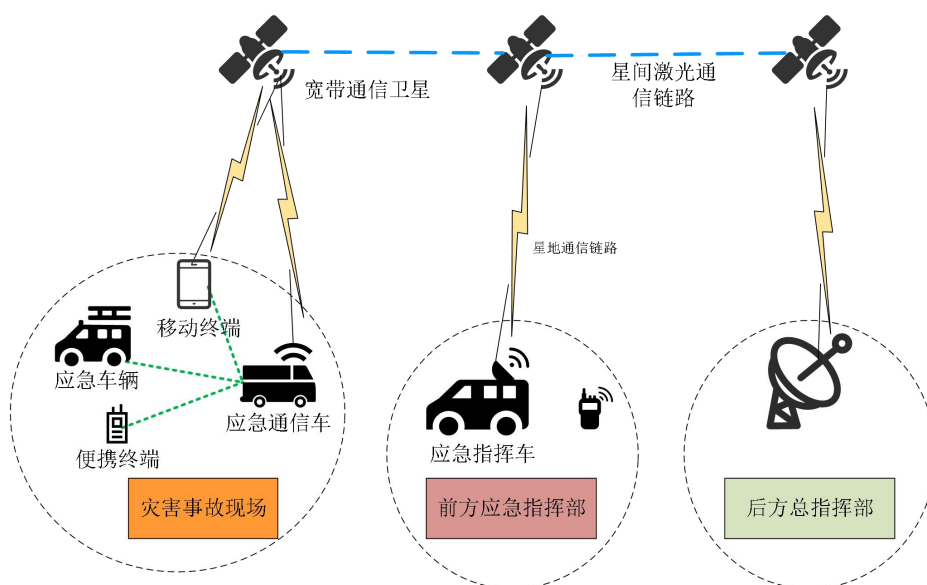


图 1-2 卫星互联网灾害应急通信响应图

1.2.2.2 边境安防通信保障

在边境复杂地形与拒止环境下，卫星互联网承载网提供全天候、高精度通信与态势感知能力。我国北斗系统是边境安防的核心基础设

施，其综合服务平台星基模块可为 3 公里范围内的无人机提供实时高精度定位，解决无信号区设备巡检难题，已在新疆电网运维中应用。2025 年 7 月发布的《应急管理北斗卫星导航系统应用总体技术要求》国家标准，进一步规范了终端接口与通信协议，确保边境应急数据传输的标准化与可靠性。国际前沿方面，美国 AST 公司联合军方成功完成全球首个非地面网络战术卫星通信演示，通过未改装智能手机直连卫星，实现战术突击套件的多媒体流传输、加密视频通话及 VPN 互联，验证了卫星互联网直连设备在边境突击作战中的可行性。我国同类技术虽未公开细节，但北斗短报文的预置部署政策显示其在边防通信中的基础性作用。

1.2.2.3 重大活动高密度瞬时通信

卫星互联网承载网通过融合低轨星座与智能计算能力，为大型活动提供大容量、低时延通信保障。我国全球首个太空计算卫星星座于 2025 年 5 月发射，12 颗卫星搭载星载智算系统与高速路由器，通过星间激光链路组网形成分布式算力池，将传统卫星数据响应时间从天级缩短至秒级，可支持百万级终端并发接入，为重大活动高密度瞬时通信提供服务保障。卫星互联网宽带互联网架构如“虹云工程”（规划 156 颗卫星）为空天地一体化通信奠定基础，而中国电科为天舟九号任务开发的测控通信网亦展示高稳定性数据传输能力，其卫星通信系统实现发射实况高清视频流回传与多路指令同步分发，此类技术可迁移至赛事直播、人流监控等瞬时高负载场景。

1.2.3 产业赋能类应用场景

卫星互联网通过星地数据协同与通导遥融合，深度赋能传统产业数字化升级，催生智慧农业、海洋经济、低空物流等新业态。其核心价值在于打破信息孤岛，实现生产要素全域互联。

1.2.3.1 智慧农业物联网

卫星互联网承载网通过“空天地一体化”监测体系，显著提升了农业生产的精准性和效率。在山东济南中科北斗数字农业示范基地，该系统整合“天网”（卫星全域监测，实现分钟级高分辨率重访）、“空网”（无人机自动巡查与精准作业）和“地网”（30 余类土壤、气象等感知设备），构建全链条数据闭环。这套技术模式在济南新旧动能转换起步区应用后，实现粮食增产 9%、收益增值 10%，并减少机收机播及自然灾害导致的损失 5%。类似地，广东清远的智慧水产基地通过中国移动“5G+天基”立体监测网络，实时分析养殖水域污染与富营养化问题，保障水产品质量安全。英德红茶产业则依托卫星遥感与全球产销信息链对接，驱动产品畅销国际市场。这些实践验证了卫星互联网物联技术在农业资源优化、风险预警与市场拓展中的核心价值。

1.2.3.2 海洋经济支持

海洋通信领域已形成“卫星主导远洋、光缆承载骨干、5G 覆盖

近海”的立体网络架构，2025年中国市场规模达 320 亿元。其中，低轨星座将海洋通信时延从 500ms 降至 50ms，带宽提升 10 倍，支撑全球海域 1 小时重访，满足远洋航运与资源勘探的实时需求，占市场 58% 份额。海底光缆技术同步升级，中天科技为东南亚铺设的超低损耗光缆传输容量达 100Tbps，损耗降低 30%。岸基“5G+卫星”双链路备份在广东、浙江试点，实现船舶调度零延迟。在应用层，华为“海洋数字孪生平台”融合卫星遥感与 AI 算法，提升环境监测效率 60%。江苏如东风电场采用动态海缆集成光纤传感，运维成本降 30%。此外，中交疏浚中标 5.24 亿元火箭海上回收船项目，船舶需在离岸 300-700 公里复杂海况下执行高精度回收任务，体现卫星互联网定位与通信技术对高端海工装备的赋能。

1.2.3.3 低空经济支撑

卫星互联网承载网通过高轨中继卫星与低轨星座组网，破解低空飞行器通信覆盖与管控难题，如图 1-3 所示。深圳苍宇天基启动全球首个高轨商业中继卫星项目，计划 2026 年发射“苍宇一号”，形成 60% 低轨覆盖和 40% 地表覆盖能力。2027 年三星组网后，将实现 100% 低轨覆盖与南北纬 80° 间地表覆盖，为无人机、载人航天等提供全天候天基测控与数据传输服务。在组网技术层面，北京邮电大学研发的“卫星互联网承载网控制系统”解决了卫星动态切换与资源调度难题，2025 年初于雄安部署，获商业航天企业广泛对接。这些技术共同构建低空经济“空天地协同一张网”基础设施。

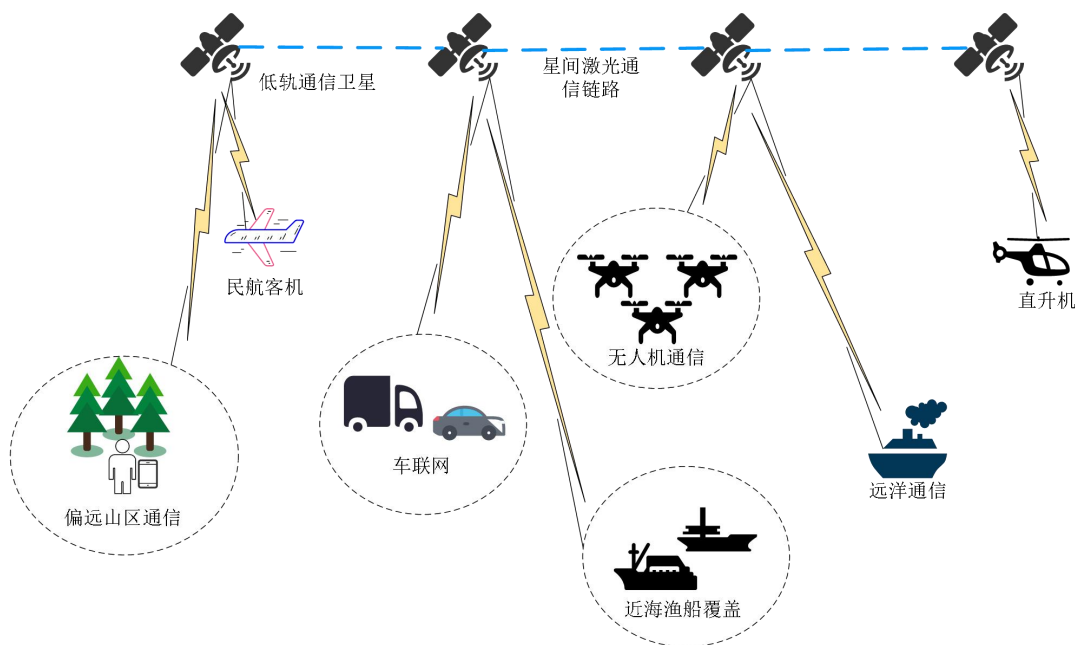


图 1-3 卫星互联网低空经济支撑图

1.2.3.4 “一带一路” 沿线数字连接与产业服务

卫星互联网承载网结合地面去中心化物理基础设施（Decentralized Physical Infrastructure Networks, DePIN）终端，推动乡村通信、产业与治理的数字化跃迁。在政策与产业协同方面，中马合作设立的“科技合作平台”在港口、农业场景部署 DePIN 终端，下沉边缘算力，并利用区块链构建跨境数据网络，优化东盟区域乡村产业链。山东济南王老村作为全国数字乡村典范，整合 72 处泉水资源与非遗工坊，通过天基宽带支持民宿、智慧市集等业态，形成“文旅+生态”发展模式，被联合国粮农组织誉为乡村振兴中国样板。全域覆盖的通信网络正成为缩小城乡数字鸿沟的关键载体。

1.2.4 科学研究类应用场景

卫星互联网为大尺度、跨学科科研活动提供关键信息基础设施，实现全球数据即时共享与协同分析，推动地球系统科学、空间探测等领域的范式变革。

1.2.4.1 极地/深海科考通信

卫星互联网承载网通过中高轨卫星与地面移动通信系统的融合，为极地与深海等极端环境提供了突破性通信支持。在极地科考领域，中国电信卫星公司联合上海清申科技于 2025 年 1 月在南极科考站成功实现我国首次基于中轨卫星“智慧天网 01 星”的 4G/5G 网络互通验证。该卫星由清华大学主导设计，运行于中轨泛同步轨道，通过星地链路将南极科考站的手机终端接入中国电信 4G/5G 核心网，实测网速超 100Mbps、时延约 300ms，支撑了高清视频通话、实时数据传输等业务，显著提升了极地科研效率与人员安全保障水平。这一技术突破解决了传统极地通信受低温、强风及极昼极夜环境影响导致的信号中断问题，为全球高纬度无网络覆盖区提供了可靠解决方案。

1.2.4.2 空间科学实验

空间科学实验对卫星互联网承载网的需求主要体现为实验数据回传、设备状态监测和远程指令传送。在轨实验平台需要将观测数据、实验影像及运行状态传送至地面科研机构，并接收实验任务调整与设

备控制指令。不同业务具有差异化的承载要求：科学数据回传关注传输容量和有效传输时间，状态监测强调连接可用性，控制指令则对传输可靠性、安全性及交付时效提出更高要求。

在通信技术在轨验证方面，欧洲空间局（ESA）支持的 LIDE 任务提供了一个典型案例。根据 ESA 于 2025 年 7 月发布的公告，LIDE 验证卫星已于 7 月 23 日发射入轨。该卫星由意大利 Tyvak International 公司牵头研制，搭载 K/Ka 频段转发器，计划与包括甚小口径终端（VSAT）在内的小型地面设备开展基于 5G 架构的宽带连接试验，并测试吞吐量、时延和信噪比等性能。该公告介绍的是发射情况与后续试验计划，验证对象并非明确指向未改装的普通手机。www.esa.int

此类科研活动要求承载网适应实验任务阶段性开展、数据集中产生及星地连接窗口受限等业务特征，在有效通信窗口内完成数据传送，为关键指令和状态信息提供优先保障，并支持传输过程记录与性能评估，为实验结果分析和技术验证提供可追溯依据。

1.2.4.3 全球气候监测

全球气候监测需要持续获取大范围、长时间序列的观测数据，并在地面接收站、数据处理中心与科研机构之间完成汇聚、传输和共享。卫星互联网承载网可为分布式观测设施和偏远地区监测站点提供通信支撑，满足观测数据回传、监测信息共享及预警信息分发等需求。

欧洲第二代气象业务卫星 MetOp-SG-A1 已于 2025 年 8 月 13 日（UTC）发射，运行于约 832 公里高度的太阳同步轨道，搭载包括哥

白尼 Sentinel-5 大气监测载荷在内的六台观测仪器，为气象观测、大气成分监测与气候研究提供数据。根据 ESA 公布的数据传输方案，MetOp-SG 通过 Ka 波段向地面站下传星上存储的观测数据，并通过 X 波段直接广播实时观测数据，供具备接收条件的用户使用。

上述业务体现了全球气候监测对大规模观测数据汇聚和差异化传输保障的需求：长期气候研究关注数据传输的完整性和持续性，气象监测与预警业务则更加关注数据交付的及时性。面向此类场景，承载网需要提供稳定的传输容量、可靠的数据交付及跨区域互联能力，并为时效敏感的数据和预警信息提供优先保障。

尽管上述应用场景在服务对象、业务规模和保障等级等方面存在差异，其承载需求可统一归纳为泛在覆盖与全域互联、高速传输与弹性承载、连续服务与可靠保障、智能协同与高效管控，以及安全可信、开放兼容与自主可控五个方面，作为后续能力愿景归纳及架构、技术研究的输入。

1.3 卫星互联网承载网能力愿景

通信增强、应急保障、产业赋能和科学研究等应用场景在覆盖范围、业务规模、时延敏感性、服务连续性及安全等级等方面存在明显差异。通信增强场景强调跨区域连接和多网络互通，应急保障场景强调基础设施受损条件下的快速接续和业务存续，产业赋能场景强调多类型业务的差异化承载，科学研究场景则强调偏远区域覆盖和大容量数据回传。综合上述场景及其业务特征，卫星互联网承载网应形成泛

在覆盖、高速传输、连续可靠、协同管控和安全可信等方面的综合能力，为后续体系架构设计和关键技术研究提供需求输入。

1.3.1 泛在覆盖与全域互联

面向偏远地区通信、“一带一路”沿线互联、海洋与航空通信、极地科考、跨境产业协作等场景，业务呈现服务区域广、地理分布离散、地面基础设施差异明显以及用户密度不均衡等特征。部分区域缺少地面网络覆盖，部分区域需要在地面网络与卫星网络之间连续接续，热点地区还可能出现高密度用户集中接入。

因此，卫星互联网承载网应具备面向陆地、海洋、空中和极地等区域的广域覆盖能力，支持不同轨道卫星、地面网络及其他空基网络之间的互联互通，并能够适应不同区域的业务密度差异。对于地面网络难以到达的区域，应提供基本的信息传输通道；对于已有地面网络覆盖的区域，应支持卫星网络与地面网络协同承载；对于跨区域、跨网络业务，应保障端到端连接关系的连续性和可达性。

1.3.2 高速传输与弹性承载

面向宽带互联网接入、航空与海事通信、高清视频回传、遥感数据传输、工业生产监测及云网服务等场景，业务类型由低速消息和窄带数据逐步扩展至语音、视频及大容量数据，呈现业务速率跨度大、上下行流量不对称、区域分布不均以及突发性明显等特征。不同业务对带宽和时延的要求差异较大，热点区域、集中回传和突发接入还可

能造成局部链路负载快速上升。

因此，卫星互联网承载网应具备与业务规模相匹配的端到端传输能力，为大容量数据回传和宽带业务提供充足带宽，为交互式业务和实时控制业务提供低时延承载，并根据业务类型、区域负载和服务等级实施差异化保障。在业务量发生变化或局部链路负载升高时，承载网还应保持必要的业务调配和负载疏导能力，避免局部拥塞对其他区域和业务造成持续影响。

1.3.3 连续服务与可靠保障

面向灾害救援、重大活动保障、航空海事安全、能源电力专网以及国防和关键信息基础设施等场景，业务通常具有突发性强、服务中断影响大、保障等级高等特征。在自然灾害、地面设施损毁、局部链路故障或网络负载激增等情况下，承载网仍需维持关键指令、救援信息和重要业务数据的持续传输。

因此，卫星互联网承载网应具备在节点故障、链路中断、网络拥塞和外部扰动条件下维持服务的能力，保障关键业务的连续性、传输完整性和服务可用性。对于不同保障等级的业务，应明确相应的可靠性和服务连续性要求；当局部网络资源受损或性能下降时，应能够限制故障影响范围，维持基本通信能力，并优先保障应急指挥、公共安全和关键行业业务。

1.3.4 智能协同与高效管控

面向大规模星座运行、海量终端接入、多轨卫星协同以及跨运营主体业务承载等场景，网络呈现节点数量多、连接关系动态变化、业务需求持续波动和管理域相互交织等特征。不同卫星、链路和地面节点在资源能力、运行状态及管理策略方面存在差异，单一节点或单一管理域难以独立掌握端到端网络状态。

因此，卫星互联网承载网应具备对网络拓扑、链路状态、业务流量和资源使用情况的统一感知与协同管理能力，支持不同轨道、不同区域和不同网络域之间的资源协调。面向规模化星座和复杂业务，应实现网络状态可感知、资源使用可调度、业务过程可监测、故障影响可定位和服务质量可评价，在降低管控开销的同时，保障业务策略的一致执行和网络资源的高效利用。

1.3.5 安全可信、开放兼容与自主可控

面向全球互联网接入、跨境通信、政企专网、应急通信及关键信息基础设施等场景，业务涉及主体多、网络边界广、跨域交互频繁，承载过程面临信息窃取、数据篡改、非法接入、拒绝服务和路由异常等安全风险。同时，卫星互联网需要与地面互联网、移动通信网、行业专网及云服务平台互联，对协议兼容、接口开放和多主体协同提出要求。

因此，卫星互联网承载网应具备覆盖节点、链路、路由、控制和

业务全过程的安全保障能力，实现通信实体可信、传输数据可保护、网络行为可监测和安全事件可追溯。承载网还应支持与主流地面网络体系及相关行业标准兼容，满足跨网络、跨平台和跨运营主体的互联需求。在涉及核心芯片、星载设备、网络系统和管控平台等关键环节时，应具备自主可控和持续保障能力，降低关键技术与核心产品受制于人的风险。

二、卫星互联网承载网体系架构

卫星互联网是由用户终端、卫星接入网、卫星互联网承载网、核心网与业务平台以及运营管理系统共同组成的完整网络体系。其中，卫星互联网接入网负责建立用户终端与卫星之间的接入连接，核心网与业务平台承担会话控制、业务管理和提供服务，卫星互联网承载网则位于二者之间，负责接入流量汇聚、星间与星地传送、路由交换、资源调度、跨域互联和服务质量保障。卫星互联网强调面向用户提供端到端连接与业务服务，卫星互联网承载网则重点解决业务流量如何在卫星节点、信关站和外部网络之间高效、可靠地传递，两者是整体系统与关键组成部分的关系。用户接入链路、核心网功能和业务平台不属于卫星互联网承载网的范围。

如图 2-1 所示，卫星互联网承载网主要由空间承载段、星地与信关站承载段以及网络控制与管理平面组成。空间承载段以具备路由、交换、缓存和处理能力的卫星节点为基础，通过同轨星间链路和跨轨链路形成在轨骨干网络；星地与信关站承载段通过馈电链路、信关站承载设备和承载互联节点，完成星地流量接续、汇聚和跨域转送；网络控制与管理平面负责拓扑感知、路由控制、流量工程、资源编排、服务质量保障和安全运维。运营商地面承载网、专线、虚拟专网及地面互联网位于卫星互联网承载网边界之外，主要为信关站提供业务回传、流量卸载和跨域传送，并进一步连接移动通信核心网、互联网、

云平台和行业专网。因此，地面承载网是卫星互联网承载网的协同网络，而不是其必然组成部分。

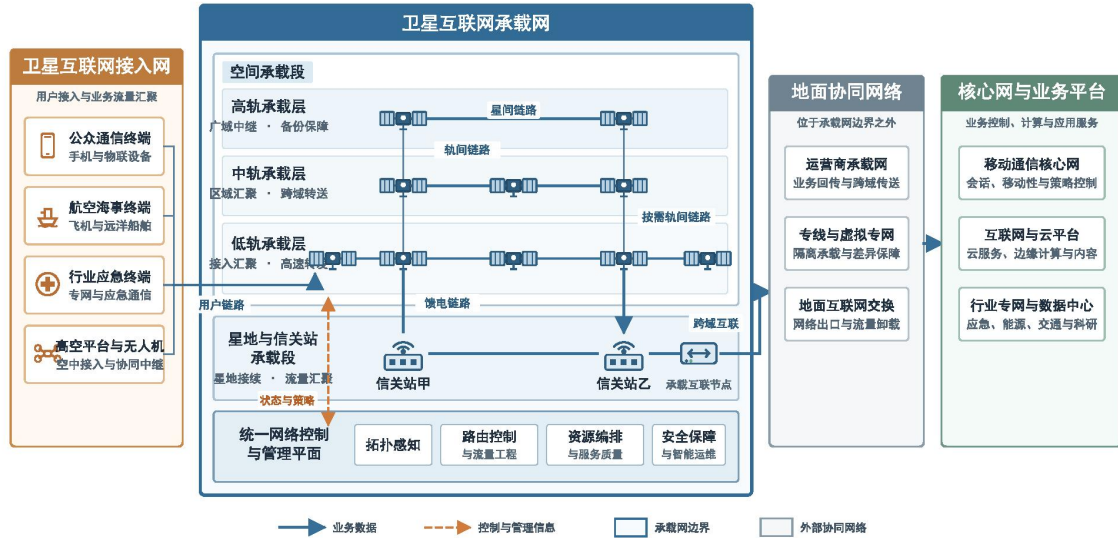


图 2-1 卫星互联网承载网架构图

在多轨协同方面，低轨卫星可主要承担用户流量汇聚、低时延转发和高容量传输，中轨卫星可承担区域汇聚与跨区域转送，高轨卫星则可提供广域中继、稳定覆盖和备份保障。不同轨道卫星通过同轨星间链路和按需轨间链路实现数据转送，并通过多信关站协同、分层拓扑管理、多轨路径选择和统一资源编排形成整体承载能力。数据平面根据业务时延、带宽、可靠性及链路状态选择同轨或跨轨路径，控制平面则通过拓扑抽象、状态交换、路由计算和故障切换协调不同轨道和星地资源。由此，高、中、低轨卫星并非简单叠加，而是依据覆盖范围、传输时延、承载容量和可靠性要求形成分层协同关系。

随着卫星由通信信号的透明转发节点向具备星上交换、路由和处理能力的网络节点演进，卫星网络也由以中高轨卫星和地面站为中心

的相对稳定系统，逐步发展为大规模低轨组网、多轨协同和星地融合的动态网络。从控制功能的部署位置及决策职责划分看，卫星互联网承载网可采用集中式、分布式和混合式三种典型架构。三者的主要区别在于网络状态如何汇集、控制策略由谁生成，以及全局管理与节点自主处理之间如何分工，并不与特定轨道或星座规模形成一一对应关系。下文分别介绍其系统组成、接口关系、数据路径及适用条件。

2.1 集中式架构

集中式架构将主要网络控制与路由决策集中于逻辑统一的控制系统，可通过软件定义网络（SDN）方式实现，如图 2-2 所示。以地面控制器为中心的部署中，控制系统负责网络状态管理、路径计算及策略下发，星载路由交换节点主要执行转发规则，并保留必要的邻居检测、状态上报与本地保护功能。逻辑集中不等于物理单点，控制系统可采用主备或集群部署。

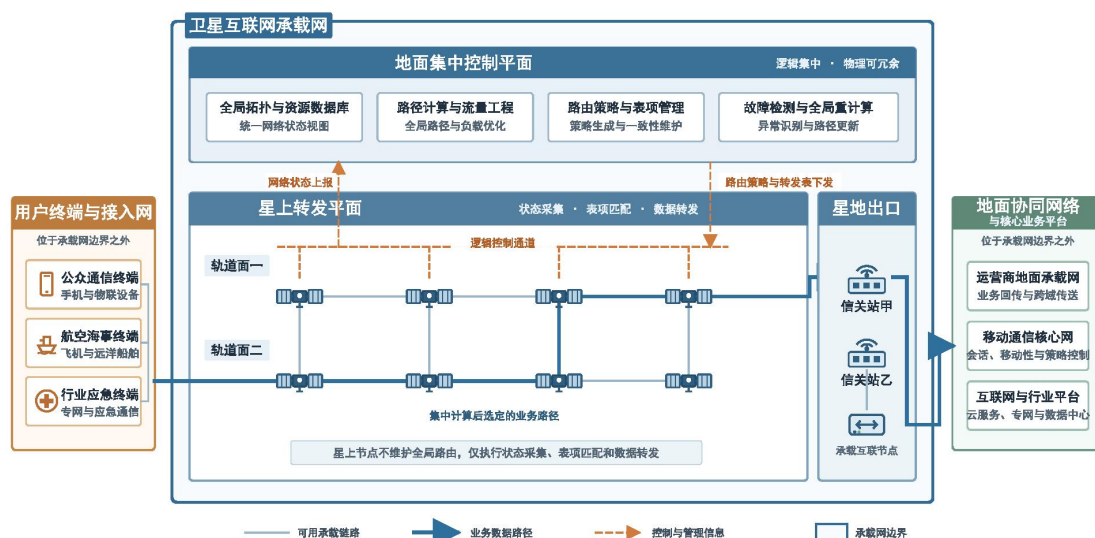


图 2-2 卫星互联网承载网集中式架构图

在接口与数据路径方面，星载节点和信关站通过控制接口上报状态、接收策略并反馈执行结果，控制系统通过北向接口对接业务与运营管理系统。业务流量依据转发表经过星载节点、星间链路和馈电链路到达信关站，或转送至其他卫星节点；控制器负责生成策略，不要求业务流量经过控制器。控制信息与业务数据可共享传输基础设施，也可采用独立通道，其可达性与资源保障需分别设计。

集中式架构便于实施统一策略、开展全局资源优化，并减轻星上复杂路径计算的负担。其主要约束是状态汇集、策略计算和下发的时效性，以及控制系统的处理能力。当控制器或控制通道异常时，已有转发表通常仍可在链路有效、表项未失效的条件下支撑转发，但新策略生成与故障后的路径调整可能受限，不能将控制失联直接等同于业务立即中断。

工程实现中，可通过控制器冗余、策略预配置及节点本地保护提高运行韧性，并根据控制通道可用性确定策略更新周期。基于拓扑快照的路径预计算、转发表切换及故障恢复机制见 3.3，本节不再展开具体算法。

2.2 分布式架构

分布式架构将路由计算与决策功能分散至多个卫星节点，各节点根据本地观测及节点间交换的路由信息，协同完成路径选择和转发更新，如图 2-3 所示。节点维护的信息范围取决于具体路由机制，可以是一定区域内的链路状态，也可以是目的网络的可达性、路径代价及

下一跳等信息，并不要求每个节点均维护完整的全网拓扑。在接口与数据路径方面，节点通过邻接通信接口交换路由信息，通过管理接口接收配置、上报运行状态；地面管理系统可以参与监测与策略配置，但不必逐次参与节点选路。业务数据依据各节点维护的转发表逐跳传送。路由信息交换范围与业务转发路径并不相同，需分别明确其传播边界、资源占用与安全要求。

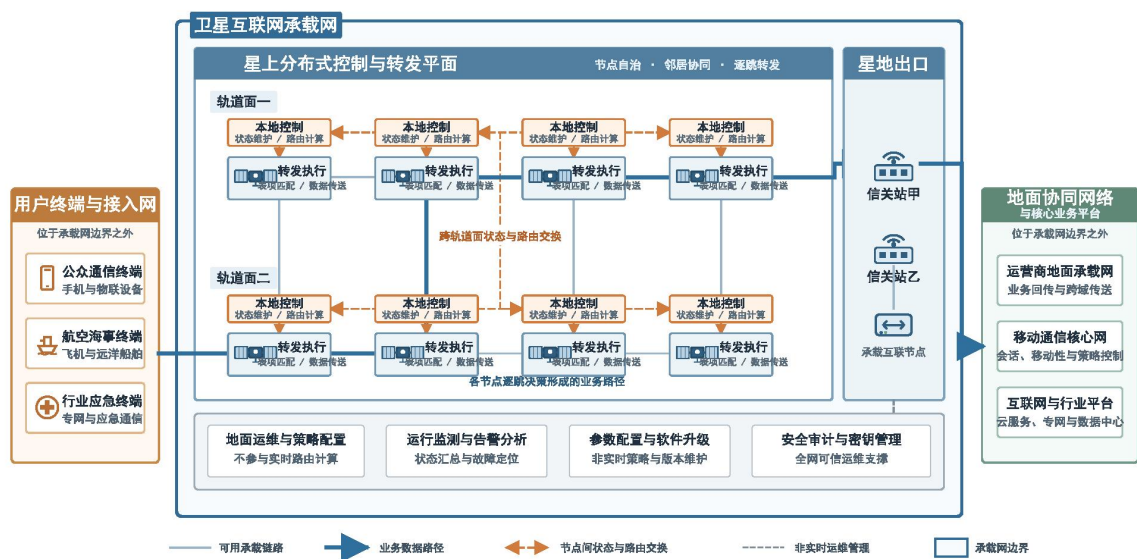


图 2-3 卫星互联网承载网分布式架构图

分布式架构的主要优势在于节点具有一定的自主决策能力，能够降低网络对单一控制节点的依赖。当部分节点或链路发生故障时，其余节点可依据故障检测结果和路由信息更新调整转发路径。在存在可用替代路径且剩余资源满足业务需求的条件下，这种机制有助于维持网络连通性和关键业务传输。同时，节点可利用本地链路状态与邻居信息，对链路变化作出响应，减少部分路由调整对地面控制往返交互的依赖；实际响应速度仍取决于故障检测、信息传播和路由收敛机制。

分布式架构的挑战主要体现在星上资源约束与多节点决策协调两个方面。节点需要承担路由信息维护和路径计算，其计算、存储及控制信令开销取决于具体路由机制、状态维护范围、更新频率和网络规模。对于大范围传播链路状态的方案，高动态拓扑可能增加状态同步与路径重算开销；采用局部信息或距离向量等机制时，则需结合具体方案评估信息完整性、收敛速度与资源消耗之间的权衡。因此，不能将完整全网拓扑维护及其资源开销视为所有分布式方案的共同特征。此外，信息传播时延、链路中断及异步更新可能造成节点间路由认知暂时不一致，引发短时环路、丢包或路径振荡，需要通过适当的更新协调与环路抑制机制加以控制。

从工程实现角度看，分布式架构还需解决异构节点之间的协议兼容与协同问题。不同厂商设备在载荷硬件、操作系统和协议实现方面存在差异，节点间协同需要明确邻居发现、路由信息交换、状态描述及身份认证等接口与规则。互操作并不要求各节点采用完全相同的内部算法，但需要对交互信息及其处理行为形成一致约定。对于跨星座互联，还应明确管理边界、路由策略和信任关系，通过接口规范与互操作验证支撑多系统协同。

2.3 混合式架构

混合式架构通过分层、分域或不同时间尺度的职责划分，组织集中控制与节点自主处理，如图 2-4 所示。其系统组成可包括全局控制系统、按需设置的区域或域控制器，以及具备本地处理能力的星载路

由交换节点。全局控制系统负责跨域路径规划、资源策略和业务约束，区域或星上节点在授权范围内完成局部调整与故障处置。

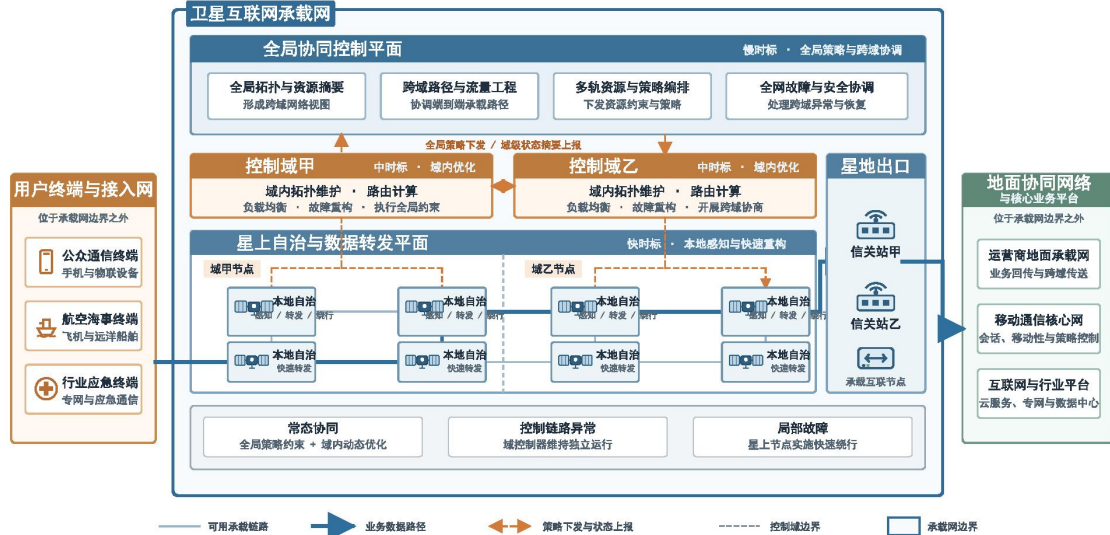


图 2-4 卫星互联网承载网混合式架构图

在接口关系方面，全局与区域控制系统之间交换资源摘要、业务约束和控制策略，区域控制系统与节点之间交换局部状态及执行结果；不同控制域之间通过约定接口协调跨域连接与资源使用。业务数据沿选定的星间、星地路径转发，不要求经过各级控制器。对于多轨协同网络，控制域可结合轨道、区域或管理关系划分，其边界不必与单一轨道层完全重合。

混合式架构能够兼顾统一管理和局部响应。正常运行时，全局控制系统开展较大范围的路径与资源优化；局部链路异常或业务突发时，节点依据既定策略和可用资源进行调整，并反馈处置结果。在存在有效替代路径及足够容量的条件下，本地保护有助于缩短业务恢复时间，后续再与全局更新策略衔接。

该架构的主要挑战是跨层级、跨控制域的职责协调。系统需要明确决策权限、策略优先级、状态同步范围、版本生效规则，以及控制失联后的降级运行边界，防止全局策略与局部调整相互覆盖或冲突。其适用性取决于业务保障要求、控制通道条件及工程实现能力，不能仅依据星座规模判断。

在完成集中式、分布式和混合式架构分析的基础上，为进一步明确不同架构的性能差异与适用边界，表 2-1 比较三类架构的功能分工、信息交互及工程约束。相关性能取决于具体协议、控制系统部署、网络规模、业务负载和故障模型，以下采用机制性描述，不给出脱离测试条件的统一时间范围或规模门槛。

表 2-1 卫星互联网承载网典型体系架构对比

对比维度	集中式	分布式	混合式
控制组织	逻辑统一的控制系统 承担主要决策	多节点协同完成路由 决策	全局、区域与节点按 职责分工
主要接口	状态上报、策略下发、 业务管理接口	邻接路由信息交换与 管理接口	分层控制、域间协同 与节点控制接口
业务数据 路径	依据下发规则转发， 无需经过控制器	依据各节点转发表逐 跳转发	依据全局策略及授权的 局部调整转发
控制响应 约束	受状态采集、中心计 算及策略下发影响	受本地检测、信息传 播及节点计算影响	局部响应与跨域协调 分别受相应控制过程 影响

对比维度	集中式	分布式	混合式
路由收敛 与恢复	依赖策略更新流程； 可配置本地保护	依赖路由协议及局部 修复机制	需协调局部恢复与后 续全局更新
资源优化	便于基于汇集状态开 展统一优化，受状态 时效性约束	优化范围取决于信息 可见性与协同机制	在全局优化与局部响 应之间进行分工
星上计算 与存储	以转发表、基础状态 及必要保护功能为主	取决于算法、状态维 护范围及更新频率	取决于下沉功能、域 内状态及保护要求
控制信令	主要来自状态汇集与 策略下发	主要来自节点间路由 信息交换	主要来自域内交换、 跨域摘要与策略交互
一致性保 障	需处理状态滞后、多 控制器同步及规则生 效差异	需处理节点异步更新 和暂时不一致	需协调跨层、跨域状 态与策略版本
故障韧性	依赖控制冗余、通道 保障及节点保护机制	依赖剩余连通性、替 代路径和协同恢复机 制	依赖控制冗余、局部 自治及降级运行机制
可扩展性 约束	状态汇集、计算与下 发能力	信息传播范围、收敛 开销及节点资源	域划分、跨域协调和 层级管理开销
适用条件	控制连接较稳定、统 一策略管理需求较强	本地自主运行需求较 强，节点具备相应处 理能力	需要兼顾跨域统一管 理与局部快速响应

对比维度	集中式	分布式	混合式
工程重点	控制平台冗余与控制 通道保障	协议适配、互操作与 更新协调	权限划分、域间接口 与跨层协同

三类架构的选型应综合考虑控制连接可用性、节点处理能力、业务保障要求及运营管理方式。集中式架构便于统一策略管理，分布式架构有利于节点自主响应，混合式架构则通过职责划分兼顾跨域统筹与局部处理。上述优势均依赖相应的协议、冗余和恢复机制，不能仅凭架构名称确定时延、抗毁性或可支持的星座规模。对于多轨、多域协同网络，可重点评估混合式架构的适配性，同时验证其接口、状态同步和降级运行机制。智能自治可作为三类架构的能力增强手段，不作为独立的第四类控制架构。

三、卫星互联网承载网关键技术

当前卫星互联网承载网关键技术呈现两种发展形态：一方面，路由优化、智能决策、网络测量等仍是学术界持续研究的重点；另一方面，星间高速链路、星上交换、网络管理与控制等技术已逐步实现设备化、系统化与规模应用，进入产业工程实践阶段。

3.1 星间/星地高速链路与传输技术

星间/星地链路是卫星互联网承载网实现卫星之间以及卫星与地面之间通信的基础，其性能直接影响着网络的传输速率、可靠性和覆盖范围。根据所采用的通信技术不同，星间/星地链路技术主要可分为激光技术和微波技术。

3.1.1 激光技术

激光技术在星间/星地链路中的应用具有诸多优势。首先，激光具有极高的频率，能够提供非常高的数据传输速率。在当今对大容量数据传输需求日益增长的背景下，激光链路能够满足如高清视频传输、大数据量科学探测数据回传等高速率业务的要求。例如，一些先进的卫星激光通信系统能够实现数 Gbps 甚至更高的数据传输速率，相比传统的微波链路有了质的飞跃。其次，激光束的方向性极强，发散角

极小，这使得激光链路具有很强的抗干扰能力。在复杂的空间电磁环境中，激光信号不易受到其他电磁信号的干扰，能够保证通信的稳定性和可靠性。而且，由于激光束的高指向性，在卫星之间建立激光链路时，所需的发射功率较低，这对于能源受限的卫星来说具有重要意义，可以有效降低卫星的能源消耗，延长卫星的使用寿命。

从公开产品配置与在轨试验看，卫星激光链路正向数百 Gbps 级传输能力发展。Starlink 公布的 V3 卫星配置包括六个 400 Gbps 级星间激光终端，该指标属于新一代产品配置，不能等同于全部在轨星座的实际运行速率。国内方面，2025 年 3 月，“光传 01/02”试验星完成 400 Gbps 星间激光通信传输试验；2026 年 1 月，中国科学院空天信息创新研究院与 AIRSAT-02 卫星开展 120 Gbps 星地激光通信业务化应用实验；同年 3 月，中国科学院光电技术研究所等单位公布高轨星地激光通信试验结果，在最远约 4.07 万公里条件下实现上、下行各 1 Gbps 传输，链路连续维持超过 3 小时。这些实例分别体现了星间高速交换、星地大容量下传和高轨远距离传输能力，但其链路距离、设备配置及验证阶段不同，所列速率不宜直接比较，也不代表单用户吞吐量或单星总容量。

然而，激光通信在星间和星地链路中的应用仍面临捕获、对准与跟踪、精密时间同步以及大气传输等方面的挑战。首先，激光波束发散角通常仅为微弧度量级，通信终端需要在卫星高速运动、平台振动和姿态扰动条件下，持续完成光束的捕获、对准和跟踪（Acquisition, Pointing and Tracking, APT）。NASA 公开技术资料显示，典型空间

激光通信终端的发散角约为数微弧度，指向误差通常需要控制在波束发散角的一小部分，部分系统需要达到亚微弧度量级。以轨道高度约 550 km 的 Starlink 系统为例，每颗卫星配置 3 条激光星间链路，单链路速率最高可达 200 Gbps，公开资料给出的链路距离可超过 5300 km。在 5300 km 链路距离下，1 μrad 的指向偏差将对应约 5.3 m 的光斑中心偏移，因此需要结合精密轨道预报、卫星姿态控制、粗精复合跟踪、平台振动抑制和提前量补偿等机制，维持激光链路的连续稳定运行。

其次，高速激光承载链路还需根据通信体制与业务功能满足相应的时间和频率同步要求。时间同步精度描述节点间的时间偏差，与 APT 系统的角度指向精度属于不同指标。皮秒级时间指标可用于表征光学时间传递、脉冲定时或测距性能，其中 1 ps 对应约 0.3 mm 的单程光程差。对于兼具高精度测距、授时或定位功能的星间链路，同步精度需根据任务需求与误差预算确定；相干光通信还需满足相应的频率与相位跟踪要求。系统设计应综合考虑卫星钟差、多普勒频移、传播时延变化、收发通道不对称、设备温漂，以及高精度时间传递中的相对论效应。高精度时间传递与稳定频率基准是相关技术的发展方向，其指标应结合具体功能和实现条件分别评估。

不同轨道高度下的链路距离、覆盖范围和动态特性存在明显差异，也对激光通信终端提出不同要求。低轨卫星距离地面较近，传输损耗和时延相对较低，但卫星相对运动速度快、可见时间短，需要频繁进行链路捕获和切换；中轨卫星单星覆盖范围明显扩大，链路动态性降低，但星地距离和自由空间传输损耗显著增加；高轨特别是地球静止

轨道卫星具有覆盖范围大、相对位置稳定等特点，但链路距离可达到数万公里，对发射功率、接收灵敏度、天线口径和指向精度提出更高要求。典型系统及相应的链路几何参数如表 3-1 所示。

表 3-1 不同轨道卫星系统的典型距离、覆盖范围及激光通信要求

轨道类型及 代表系统	典型轨 道高度	星地斜距	单星几何 覆盖直径	星间链路 距离	对激光通信的主要影响
低轨： Starlink	约 550km	约 1120~ 1820km	约 1880~ 3330km	公开激光 链路可超 过 5300km	卫星相对运动快，链路 切换频繁，对快速捕 获、微弧度级跟踪和多 普勒补偿要求高
中轨： O3bmPOWER	约 8000km	约 10470~ 11820km	约 9190~ 12030km	未公开配 置激光星 间链路； 同高度无 遮挡几何 上限约 25760km	覆盖范围较大、跟踪速 度低于低轨，但自由空 间损耗增大，需要提高 光功率、接收口径和探 测灵敏度
高轨：典型 GEO 通信系 统	35786km	约 39070~ 40580km	约 12700~ 15890km	同高度无 遮挡几何 上限约 83350km	相对地面位置稳定、单 星覆盖广，但链路距离 和空间损耗最大，对链

轨道类型及 代表系统	典型轨 道高度	星地斜距	单星几何 覆盖直径	星间链路 距离	对激光通信的主要影响
					路预算、终端口径及天 气保障能力要求最高

另一方面，大气影响主要作用于星地激光链路，而真空环境中的星间链路基本不受云雾和大气湍流影响。对于星地链路，云层可能造成光链路完全中断，雾霾、沙尘、气溶胶和大气湍流则会引起吸收、散射、光束漂移、波前畸变和信号闪烁。自适应光学可以补偿湍流引起的部分波前畸变，但无法解决厚云遮挡问题。因此，除采用自适应光学和 1064 nm、1550 nm 等大气窗口波长外，还需要部署地理分散的光学地面站，结合气象预测开展站点选择和链路切换，并通过激光与射频链路互备、自适应编码调制以及业务缓存与重传机制，提高星地承载链路的连续性和可用性。对于中高轨系统，轨道高度增加主要扩大自由空间传播距离和链路损耗，而大气传输损耗更多取决于地面站位置、链路仰角和局部天气条件，因此不能简单认为轨道越高，大气衰减就按距离同比增加。

在编码调制方面，针对空天地光信道的特点，研究人员提出了一系列新型的编码调制方案。例如，基于空天地光信道的新型低密度奇偶校验（Low Density Parity Check, LDPC）编码非等差映射幅度位置调制（Amplitude and Pulse Position Modulation, APPM）方案，该方案结合了 LDPC 编码的强大纠错能力和 APPM 调制的高效频谱利用

率,能够在复杂的光信道环境下实现可靠的数据传输。还有 RS-LDPC-CC 乘积码编码方案,通过将里德-所罗门 (Reed-Solomon, RS) 码、LDPC 码和卷积码 (Convolutional Code, CC) 进行级联,进一步提高了编码的纠错性能,增强了系统对信道噪声和干扰的抵抗能力。此外,基于码重判决的低复杂度 Turbo 匹配编码方案也在一定程度上提高了编码的效率和性能,降低了编码解码的计算复杂度,更适合在资源受限的卫星平台上实现。

3.1.2 微波技术

微波技术是目前星间/星地链路中应用较为广泛的一种通信技术。微波的波长范围在毫米到米之间,其在空间通信中的优势在于对卫星的捕获、对准和跟踪精度要求相对较低。相比激光链路,微波链路的建立和维护更加容易,系统复杂度相对较低。这使得微波技术在早期的卫星通信系统以及一些对通信设备复杂度和成本较为敏感的应用场景中得到了广泛应用。例如,在一些低轨卫星星座系统中,为了实现快速组网和低成本部署,部分星间链路采用了微波技术。

微波技术在大气传输中的性能相对较为稳定,受天气条件的影响较小。与激光信号相比,微波信号在穿越大气层时的衰减和散射程度较轻,能够在不同的天气条件下保持相对稳定的通信质量。这使得微波链路在星地通信中具有一定的优势,尤其是在需要保证全天候通信的应用场景中,如全球通信服务、军事通信等。

微波链路的应用定位受到可用频谱、传播损耗、终端能力及业务

需求等因素共同影响。L/S 波段受降雨影响相对较小，适用于移动卫星通信、语音及低速率数据等业务，但实际传输能力受到获配带宽和系统配置约束。Ku 波段广泛用于卫星广播与宽带接入，在可用带宽、终端尺寸和设备成熟度之间具有较好的工程适用性，链路设计需考虑降雨衰减并预留相应余量。Ka 波段可为宽带接入和馈电链路提供较丰富的频谱资源，但对降雨等传播条件更为敏感，需要结合自适应编码调制、功率控制及站点分集等措施提高链路可用性。更高频率的 Q/V 频段是扩展馈电链路容量的技术方向，其应用受到大气衰减、射频器件性能、设备功耗和地面站部署条件等因素制约。具体频率区间及上、下行方向应以相应系统获准的配置为准，其中 50.2—50.4 GHz 为禁止发射的被动业务保护频段，不用于主动馈电传输。如图 3-1 所示，卫星通信可根据业务需求采用 L/S、Ku、Ka 等频段，并探索采用 Q/V 频段扩展馈电容量。各频段的实际速率、可用带宽和链路可用性取决于频率许可、天线配置、调制编码、传播环境及资源分配。

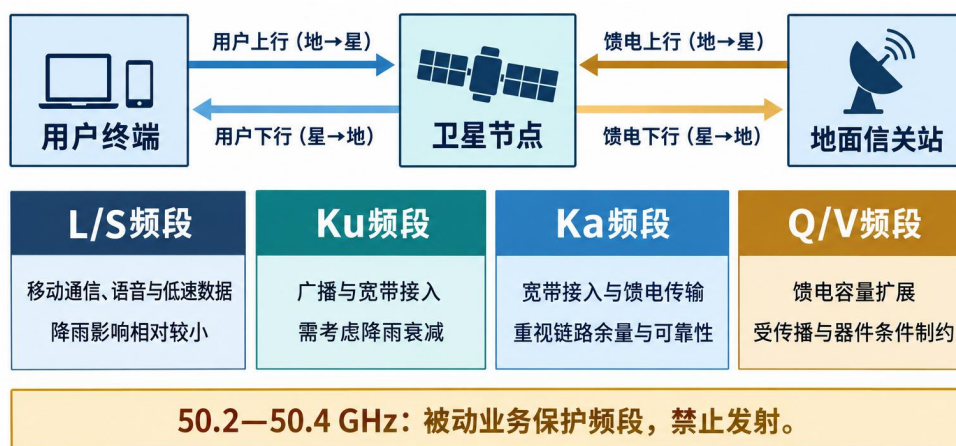


图 3-1 卫星通信频段应用与链路分工示意图

然而，微波技术也存在一些局限性。首先，微波的频率相对较低，所能提供的数据传输速率有限。随着业务需求的不断增长，传统微波链路的传输速率逐渐难以满足高清视频、大数据传输等高速率业务的要求。为了提高微波链路的传输速率，研究人员不断探索新的技术手段，如采用多输入多输出（Multiple-Input Multiple - Output, MIMO）技术，通过在发射端和接收端同时使用多个天线，利用空间复用技术增加信道容量，从而提高数据传输速率。其次，微波信号的波束较宽，抗干扰能力相对较弱。在空间电磁环境日益复杂的情况下，微波链路容易受到其他电磁信号的干扰，影响通信的可靠性。为了增强微波链路的抗干扰能力，通常采用扩频技术，将信号频谱扩展到较宽的频带范围内，降低信号功率谱密度，从而提高信号的抗干扰性能。此外，还可以通过优化天线设计，提高天线的方向性和增益，减少外界干扰信号的接收。

在星间链路的构建方面，不同轨道高度的卫星之间以及同一轨道平面内卫星之间的微波链路设计各有特点。对于低轨卫星星座，同轨道面卫星间采用全贯通或非全贯通激光微波链路，而异轨道面星间也可采用类似的链路方式。在基于高轨星座的星间星地承载网构建中，高轨星座的星间承载网，如地球静止轨道（Geostationary Earth Orbit, GEO）星间承载网和倾斜地球同步轨道（Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO）星间承载网，借助星地承载网进行转接互通，且均采用常态化通联的激光微波链路。卫星和信关站之间的星地承载网则常采用常态化通联的微波链路，以实现稳定的通信连接。

总体而言，Ku、Ka 波段已广泛应用于卫星宽带接入和馈电链路，是现阶段卫星互联网的重要承载频段。其中，Ka 波段能够支持较大带宽配置，其应用需结合部署区域的降雨特征、地面站仰角及目标可用性，通过链路余量设计、自适应编码调制、功率控制和站点分集等措施应对传播衰减。雨衰增加了系统设计与运行保障要求，但不改变 Ka 波段在宽带卫星通信中的重要地位。对于 Q/V 及更高频段，应结合具体系统区分试验验证、部署建设与实际运营阶段，重点评估大气衰减、器件成熟度、设备功耗和部署成本。

从链路类型看，星间链路承担卫星节点之间的流量转送，其容量需求取决于汇聚业务量、转发跳数及流量分布。多跳路径中的可用吞吐量受到瓶颈链路及沿途资源竞争的约束，同一业务还会占用多段链路资源。星地馈电链路承担星上流量与地面信关站之间的接续，其容量配置需结合可见卫星数量、汇聚负载、可用通信窗口和站点切换安排。对于间歇可用的链路，还需综合传输速率、有效连接时长及协议开销评估可交付数据量，不能仅以峰值速率判断承载能力。用户接入链路虽不属于本白皮书的承载网范围，但其流量规模与业务分布是星间和馈电链路容量规划的重要输入。

从业务传送方式看，单播面向单一目的节点或用户，多个接收方分别获取相同内容时，可能在公共路径上形成重复传输；组播与广播面向多个接收方，可在共享路径或覆盖范围内减少重复发送，但节省程度取决于接收方分布、节点复制位置和链路支持能力。点到点星间链路上的组播通常需要在分支节点复制数据，并分别占用后续链路容

量；具有共享波束的星地下行可支持同一内容的一对多传送，但跨波束分发仍可能需要重复占用资源，传输效率也受到目标接收方链路质量及可靠性要求的约束。因此，带宽分析应分别考虑频谱带宽、链路可用速率及业务实际占用，结合单播业务叠加、组播分支复制和广播覆盖范围进行容量核算。

3.2 星上交换与转发技术

卫星互联网承载网的交换技术是实现卫星节点间数据高效转发的核心支撑，其发展历程与卫星处理能力的演进密切相关。早期卫星主要采用透明弯管转发模式，仅在物理层完成信号放大和频率转换，交换功能完全依赖地面站，这种模式虽简单但灵活性极差，无法适应复杂业务需求。

随着星上处理能力的提升，现代卫星已能在链路层甚至网络层执行交换功能。目前主要的交换实现方式包括：

- 透明转发架构：仅进行频率转换和信号放大，保持波形透明但功能有限，适用于对时延敏感且无需复杂处理的场景。例如，在一些简单的气象数据采集卫星网络中，由于数据量相对较小且对实时性要求较高，透明转发架构能够快速将采集到的数据传输回地面，满足业务需求。
- 信道化交换：通过分析/合成滤波器组实现灵活带宽分配，可根据业务需求动态调整信道资源，提升频谱利用率。在多业务并发的卫星通信场景中，不同业务对带宽的需求各异，信道化交换技术

能够针对语音、视频、数据等不同业务类型，精准分配所需的带宽资源。如在一个同时支持高清视频传输和大量物联网设备数据上传的卫星网络中，信道化交换可将频谱资源合理划分，为高清视频业务分配较大带宽以保证画质流畅，为物联网设备分配相对较小但足以满足其数据传输速率的带宽，从而有效提升整个网络的频谱利用效率。

- 分组交换：支持星上 IP 路由和存储转发，能实现数据的智能调度，但对星上处理能力要求较高，需平衡处理延迟与传输效率。以 Starlink 卫星网络为例，其采用分组交换技术，在面对大量用户的互联网接入请求时，能够根据每个数据包的目的地址和网络实时状态，智能选择最优路径进行转发。然而，由于卫星上的计算资源和存储资源有限，在处理大量数据包时，如何在保证高效路由的同时，避免因处理延迟导致数据包积压，是分组交换技术在卫星互联网承载网应用中需要重点解决的问题。

交换可在多个维度展开，包括空间维度（波束间切换）、频率维度（频段间转换）和时间维度（时隙调度）。在空间维度，当卫星的覆盖区域内存在多个地面终端需要通信时，通过波束间切换，可将通信波束从一个终端切换至另一个终端，实现不同区域用户的通信需求。例如，在城市上空的卫星通信中，当某一区域的用户密集度发生变化时，卫星可通过调整波束指向，将更多通信资源分配给用户密集区域。在频率维度，根据不同业务对频率特性的要求以及当前频谱使用情况，进行频段间转换，确保通信质量。如在一些对电磁干扰较为敏感的通

信业务中，可将通信频段切换至干扰较小的频段。在时间维度，时隙调度能够在不同时间段为不同业务分配传输时隙，提高传输效率。例如，对于实时性要求极高的语音通话业务，优先分配时隙以保证通话的连续性。对于非实时性的文件传输业务，则可在语音业务空闲时隙进行传输。

未来发展趋势聚焦于软件定义交换，通过可编程架构实现灵活重构。软件定义交换允许网络管理者通过软件编程的方式，对网络交换设备的功能和行为进行灵活配置和控制。在卫星互联网承载网中，面对复杂多变的业务需求和网络拓扑，软件定义交换能够快速调整交换策略。当网络中某条链路出现故障时，可通过软件定义的方式，迅速将数据流量切换至其他可用链路，保障通信的不间断。光子交换技术将提供超高吞吐量，满足海量数据传输需求。光子交换利用光信号进行数据交换，具有高速、大容量、低能耗等优势。随着高清视频、大数据传输等业务的迅猛发展，卫星互联网承载网对数据传输速率的要求越来越高，光子交换技术有望成为解决这一问题的关键。在未来的卫星遥感数据传输中，大量高分辨率图像和视频数据需要快速回传至地面，光子交换技术能够以其超高的吞吐量，满足这一需求。而 AI 驱动的智能调度算法能优化资源利用效率，动态适配业务波动。AI 算法可实时分析网络流量、业务类型、链路状态等信息，智能地调度网络资源。在突发业务流量高峰时，AI 驱动的智能调度算法能够迅速感知并调整资源分配，优先保障关键业务的通信质量，同时合理分配资源给其他业务，提高整个网络的资源利用效率。

3.3 高动态网络路由技术

高动态网络路由技术主要解决卫星互联网承载网中路径随时间变化、业务流量动态分布及故障条件下的数据转发问题。卫星轨道运动使部分拓扑变化具有可预测性，而链路质量波动、设备故障和业务突发又引入了不确定性。因此，路由机制需要结合轨道预测与实时网络状态，在星上计算、存储和链路资源受限的条件下，兼顾路径效率、更新开销和业务连续性。集中式、分布式和混合式路由控制的功能分工与适用条件见第二章，本节重点讨论路由信息维护、路径计算、转发表更新和故障恢复等具体机制。

在路由信息维护方面，需要根据网络规模和决策需求确定状态采集、交换及存储范围。典型机制包括链路状态和距离向量两类：链路状态机制以 OSPF、IS-IS 为代表，在规定范围内传播链路状态信息，形成相应区域或层级的拓扑视图；距离向量机制以 RIP 为代表，通过与相邻路由器交换目的网络及路径度量等信息更新路由表，无需建立完整的全网拓扑。上述协议用于说明信息维护方式的差异，其在高动态卫星网络中的应用仍需进行适配。针对轨道运动引起的可预测变化，可利用星历和链路可见性信息建立时变拓扑模型，再结合实际链路状态修正预测结果。通过分层分域维护、增量更新和事件筛选，可减少不必要的状态传播，但需评估信息简化与更新滞后对路径决策的影响。

在路径计算方面，需要综合考虑链路可用时段、剩余容量、传输时延及业务保障要求。对可预测的拓扑变化，可提前生成候选路径及

其有效时间窗口，并在路径启用前核验实际链路条件；对拥塞、链路劣化等突发变化，则依据最新状态开展局部修正或重新计算。不同业务的选路目标有所区别：交互业务关注时延与抖动，大容量数据传输关注可用带宽和传输完成时间，关键业务则需兼顾路径可靠性及备用资源。路径评价还应考虑预计可维持时间与切换代价，避免仅依据瞬时性能反复调整路径。

在路由更新与切换方面，可结合周期更新、预测触发和事件触发机制组织转发表调整。对于计划内的拓扑切换，提前分发候选策略，明确生效条件、策略版本及有效期限；对于非计划链路中断或质量变化，根据影响范围触发局部或区域性更新。多节点更新存在传播与执行时差，需要通过更新顺序协调、版本管理或新旧路径过渡等措施，降低短时环路、黑洞及报文乱序风险。在新旧链路存在重叠可用窗口且资源允许时，可采用先建立新路径、再撤销旧路径的方式减小业务中断；不具备相应条件时，则需评估切换间隙及其业务影响。

在故障恢复方面，应区分故障检测、快速绕行与后续路径优化三个环节。节点通过链路状态监测、邻居保活及转发异常信息发现故障，在存在有效备用路径且剩余容量满足要求时，执行本地保护或局部修复，缩短业务受影响时间。随后更新相关路由状态，重新评估路径与资源分配，并协调临时路径向后续路径过渡。备用路径需要随拓扑变化持续校验，不能将预先计算等同于始终可用；当网络分区或资源不足时，应结合业务优先级实施限流、降级或中断告警，避免将快速恢复表述为任何条件下均可保障业务不中断。

路由技术的关键评价指标包括端到端时延、丢包率、业务吞吐量、路径切换中断时间、故障恢复时间、路由收敛时间，以及控制信令开销和星上计算、存储占用。其中，路由收敛时间与业务恢复时间应分别评估，启用备用路径可能先于相关路由状态重新收敛。不同方案的比较应明确星座规模、链路变化模型、故障类型、业务负载、控制链路条件及状态更新周期，并说明指标的测量起止点。星上资源需求取决于具体算法、状态维护范围和更新频率，不宜仅依据控制架构作统一判断。

高动态路由的主要难点在于预测误差与突发变化并存、多节点异步更新，以及资源受限条件下的路径优化。后续研究可重点围绕预测与实测融合、分层分域状态维护、低开销增量更新、切换一致性和快速恢复展开。人工智能方法可辅助链路状态预测、候选路径筛选及策略优化，但需评估其跨场景泛化能力、在线推理开销和策略稳定性，并通过离线训练、受限验证、约束检查及回退机制控制上线风险，支撑可验证、可控制的路由决策。

3.4 高动态移动切换技术

卫星互联网承载网的移动切换技术需应对卫星高速运动（如 LEO 卫星约 7.8km/s）带来的拓扑动态变化，主要涉及三类切换场景：

- **波束间切换：**发生在单星多波束覆盖区内，需毫秒级快速切换以保证业务连续性，关键技术包括基于信号噪声比和位置预测的切换算法，可显著降低切换失败率。在一个拥有多个波束覆盖城市

区域的卫星网络中，当移动终端（如手机、车载终端）在城市中快速移动时，会从一个波束覆盖区域进入另一个波束覆盖区域。基于信号噪声比的切换算法会实时监测移动终端接收到的信号噪声比，当该值低于某个阈值时，触发切换流程。同时，结合位置预测算法，根据移动终端的历史移动轨迹和当前速度、方向等信息，预测其即将进入的波束区域，提前做好切换准备，从而在毫秒级时间内完成波束间切换，确保用户的通话、视频播放等业务不中断。

- 卫星间切换：由 LEO 卫星过顶引起，需星间协同确保平滑过渡，多卫星协同的软切换技术和基于轨道参数的预先切换准备能减少服务中断时间。当 LEO 卫星在轨道上运行时，地面终端会随着卫星的移动而需要从一颗卫星的覆盖范围切换到另一颗卫星的覆盖范围。多卫星协同的软切换技术，让目标卫星提前与源卫星进行信息交互，获取移动终端的相关信息，包括通信状态、业务类型等。同时，基于轨道参数的预先切换准备，通过精确计算卫星的轨道参数，预测卫星间切换的时间和位置，提前为移动终端分配目标卫星的资源，如信道、时隙等。在实际应用中，例如在全球卫星移动通信系统中，当用户乘坐飞机跨越不同卫星覆盖区域时，通过多卫星协同的软切换技术和基于轨道参数的预先切换准备，可将服务中断时间降低至极短，保障用户在飞行过程中的通信体验。
- 轨道间切换（如 LEO-GEO 切换）：涉及不同高度卫星的配合，需

解决链路特性差异带来的适配问题，双连接技术可保持新旧链路的临时并行传输，提升切换成功率。LEO 卫星和 GEO 卫星具有不同的轨道高度和链路特性，LEO 卫星链路具有低时延、高带宽但覆盖范围小的特点，而 GEO 卫星链路具有高时延、相对较低带宽但覆盖范围大的特点。当移动终端需要从 LEO 卫星网络切换到 GEO 卫星网络时，双连接技术发挥作用。在切换过程中，移动终端同时与 LEO 卫星和 GEO 卫星建立连接，先通过 LEO 卫星链路保持当前业务的持续进行，同时逐渐将业务转移到 GEO 卫星链路上。例如，在偏远地区的应急通信场景中，一开始通过 LEO 卫星提供高速率的通信服务，满足应急救援初期对大量数据传输的需求。随着救援工作的持续推进，当 LEO 卫星即将离开覆盖区域时，通过双连接技术，平滑地将通信切换到 GEO 卫星上，确保应急通信的稳定性和连续性，提升切换成功率。

移动切换的核心挑战在于多普勒频移补偿和业务感知策略。由于卫星和移动终端的相对高速运动，会产生多普勒频移现象，导致信号频率发生偏移，影响通信质量。通过终端 GPS 信息和卫星星历数据可实现多普勒效应的精准预测与补偿。利用终端的 GPS 模块获取自身的位置、速度等信息，结合卫星的星历数据（包括卫星的轨道参数、位置、速度等），精确计算出多普勒频移的大小和方向，然后在接收端和发射端进行相应的频率调整，补偿多普勒频移的影响。针对不同业务类型（如紧急通信需无缝切换，普通数据业务可容忍短暂中断），需制定差异化切换策略。对于紧急通信业务，如医疗急救、消防救援

等通信场景，要求切换过程必须无缝进行，以保障关键信息的及时传递。此时，移动切换技术应优先采用快速、可靠的切换算法，不惜消耗更多资源来确保切换的零中断。而对于普通数据业务，如文件下载、电子邮件收发等，可在保证数据完整性的前提下，适当容忍短暂的中断，采用相对节能、资源消耗较少的切换策略。性能指标方面，切换中断时间需控制在 50ms 以内，成功率要求超过 99.9%，同时需优化信令开销以避免网络拥塞。在实际的卫星互联网承载网建设和优化中，通过不断改进移动切换技术和算法，努力满足这些严格的性能指标要求，提升用户体验。

3.5 网络管控与异构资源编排技术

卫星互联网承载网的管理与控制技术旨在实现通信、计算、存储、频谱和能源等异构资源的协同感知、统一编排与动态调度，SDN 和网络功能虚拟化（Network Functions Virtualization, NFV）是核心支撑技术。

SDN 通过分离控制平面和数据平面，实现集中式网络视图和可编程转发规则，地面控制中心可基于全局视角优化资源配置。在一个包含多种轨道卫星（如 LEO、MEO、GEO 卫星）以及地面站的卫星互联网承载网中，地面控制中心利用 SDN 技术，能够实时获取整个网络的拓扑结构、链路状态、流量分布等信息，形成全局网络视图。然后，根据业务需求和网络状态，通过编程的方式为各个卫星节点和链路制定转发规则。当某一地区突发重大活动，导致该区域的网络流

量剧增时，地面控制中心可通过 SDN 技术，迅速调整相关卫星节点的转发策略，将更多网络资源分配给该区域，保障通信质量。

NFV 将传统网络功能虚拟化，支持服务功能链的动态部署，提升网络弹性。NFV 技术将原本由专用硬件设备实现的网络功能（如路由、交换、防火墙等），通过软件方式在通用的服务器、存储和网络设备上实现。在卫星互联网承载网中，可根据业务的变化和需求，灵活地在卫星或地面站上动态部署和调整这些虚拟网络功能。例如，在应对自然灾害等紧急情况时，可快速在受灾地区附近的卫星上部署应急通信所需的网络功能，如临时的路由功能和流量调度功能，增强网络的应急响应能力和弹性。管理功能涵盖：

- 资源编排：联合优化计算、存储和频谱资源，基于博弈论和优化理论解决多维约束问题。在卫星互联网承载网中，卫星的计算资源、存储资源以及频谱资源都十分有限且珍贵。资源编排需要综合考虑各种资源的分配和利用。基于博弈论的方法，将不同的业务和用户看作博弈参与者，通过构建博弈模型，分析各方在资源竞争中的策略和行为，寻求资源分配的最优解。例如，在频谱资源分配中，不同业务对频谱的需求和优先级不同，通过博弈论模型，让各业务在竞争中达到一种平衡，实现频谱资源的高效利用。同时，运用优化理论，建立包含计算资源、存储资源和频谱资源等多维度约束条件的数学模型，通过优化算法求解，得到最优的资源分配方案，提高整体资源利用率。
- 性能监控：实时采集关键绩效指标，通过数字孪生技术构建网络

虚拟映像，支持事前仿真和优化决策。通过在卫星互联网承载网的各个节点（卫星、地面站等）部署监测设备和软件，实时采集诸如网络吞吐量、时延、丢包率、卫星设备的 CPU 利用率、内存使用率等关键绩效指标。数字孪生通过融合网络拓扑、链路状态、业务负载及设备运行数据，在给定建模范围、时间粒度和误差条件下，构建真实网络的动态虚拟映射。借助该映射，可在策略部署前开展路由调整、资源配置和故障处置等方案的仿真评估，分析其潜在影响，为方案选择与风险识别提供验证依据。受模型简化、测量不完整、状态更新滞后及同步开销等因素影响，仿真结果与实际运行表现可能存在偏差，需结合实测数据持续校准，并通过实际部署后的监测与反馈验证策略效果。

- **故障管理：**卫星互联网承载网的故障管理需要协同开展状态采集、故障诊断、可信记录与受控恢复。状态采集通过设备遥测、链路探测、性能计数器及运行日志等获取网络运行证据；故障诊断结合告警关联、历史状态与多源数据交叉验证，识别设备异常、链路劣化及安全事件。入侵检测系统主要用于发现可疑流量和入侵行为，为安全事件分析提供线索，不能替代设备健康监测与链路故障检测。可信记录用于保存状态、告警、诊断结果及处置过程，可采用身份认证、数字签名、受保护的时间戳和审计日志等机制；在需要多方共同维护记录的场景中，也可采用区块链存证。此类机制能够增强记录的完整性与可追溯性，但不能单独证明输入数据所描述的事实真实，仍需结合数据来源、采集设备可信性及交

叉验证结果判断。恢复操作则由网络管控系统依据诊断结果、预设策略与授权范围执行，并通过执行前检查、执行后验证和失败回退控制风险；对影响范围较大或诊断置信度不足的操作，应引入人工确认。

随着星载处理器、存储器和智能载荷能力提升，卫星互联网承载网所编排的资源将由链路、频谱和转发能力进一步扩展至计算与存储资源。其基本机制是统一感知卫星、信关站、地面边缘节点及云数据中心的算力负载、存储容量、链路带宽、传输时延和能源状态，并根据任务的数据位置、处理时限、资源需求及安全等级，联合确定任务处理位置、数据传输路径和资源分配方案。对于数据压缩、协议处理、缓存、业务识别和轻量化模型推理等任务，可优先在星上或信关站边缘节点完成处理，减少原始数据回传和星地链路占用；对于计算量较大或需要全局数据的任务，则可卸载至地面边缘节点或云数据中心。相关技术需要重点关注任务完成时延、计算资源利用率、链路带宽占用、任务迁移开销和单位任务能耗等指标，并在星上算力有限、能源受限及网络拓扑动态变化条件下，实现通信、计算、存储和能源资源的协同调度。

人工智能技术的引入正在重塑管理模式，深度学习算法可自动发现网络性能瓶颈，强化学习能通过试错自主改进资源分配策略。深度学习算法能够对大量的网络运行数据进行深度分析，自动识别出网络中的性能瓶颈所在。例如，通过对网络流量数据、节点资源使用数据等的深度学习分析，发现某个卫星节点由于计算资源不足，导致数据

包处理延迟过高，成为网络性能瓶颈。

强化学习可用于辅助卫星互联网承载网的路由优化与资源调度。模型主要利用历史数据、仿真环境或数字孪生平台开展离线训练，通过反馈迭代获得候选策略。策略评价除考虑吞吐量、时延和丢包率等性能目标外，还需明确链路容量、业务优先级、安全策略及服务连续性等约束，不能仅依靠奖励函数保证运行安全。

候选策略上线前需经过约束检查、仿真评估与策略审计，并在限定节点、业务范围和资源额度内开展受限在线验证，再通过灰度部署逐步扩大应用范围。运行过程中持续监测业务性能与策略行为，出现约束违反、性能劣化或异常决策时，停止策略扩展或执行，回退至经验证的基线策略，必要时由人工接管。模型更新也应遵循上述验证流程，避免在生产网络中开展无约束探索。强化学习的优化效果受训练数据、环境模型及运行条件影响，不保证达到全局最优。

AI 驱动的自主管理将使卫星互联网承载网能够自动感知网络状态变化、自主决策并执行相应操作，减少人工干预。意图驱动网络管理则允许网络管理者以自然语言或高级抽象的方式表达网络管理意图，系统自动将其转化为具体的管理操作和策略。通过与 3GPP 5G 管理框架、ETSI MEC 管理接口等标准化体系的深度融合，促进卫星互联网网络与地面 5G 网络等其他网络的协同工作，提升整个网络生态的智能化和自动化水平。

3.6 网络感知、建模与数字孪生技术

网络感知、建模与数字孪生技术是掌握卫星互联网承载网运行状态、评估网络性能并支撑管控决策的重要基础。网络感知负责获取拓扑、链路、资源和业务等运行信息，网络建模负责形成对网络结构及运行规律的统一描述，数字孪生则通过构建与物理网络同步映射的虚拟网络环境，为状态分析、策略验证和故障推演提供支撑。由于卫星高速运动、星间链路周期性切换、星地信道时变以及星上计算与存储资源受限，卫星互联网承载网面临状态采集不完整、测量信息滞后、多源数据难以统一表达以及虚实网络同步开销较高等关键问题。

在基本原理与实现机制方面，首先需要建立覆盖链路、网络和业务资源的多层次感知体系。链路级感知主要采集载噪比、误码率、多普勒频移、链路可用性和剩余带宽等信息，用于反映星间链路和星地链路的传输状态；网络级感知主要获取拓扑连接关系、端到端时延、吞吐量、丢包率、队列长度和路由状态等信息，用于刻画业务传输路径及网络整体运行情况；资源与业务级感知主要采集星上计算、存储和能源状态，以及业务类型、流量规模和服务质量需求，为跨资源协同和差异化业务保障提供依据。

网络状态感知可采用主动探测与被动监测相结合的方式。主动探测通过发送专用探测报文获取端到端时延、可达性和路径性能，测量结果较为直接，但会占用一定的链路资源；被动监测通过分析业务报文、设备计数器和运行日志获得网络状态，附加开销较低，但测量结

果受业务分布和采样周期影响。对于关键链路、重点业务和故障诊断，可采用主动探测提高测量精度；对于常态化运行监测，则以被动采集和周期上报为主，以平衡状态可见性与通信开销。

在网络感知数据基础上，需要结合卫星轨道、链路计划和业务运行规律建立统一的网络模型。卫星轨道具有较强的周期性和可预测性，可根据轨道参数预先推演卫星位置、可见关系和链路切换时刻；对于信道质量、业务负载和突发故障等不确定因素，则需要利用实时测量数据对模型进行持续校准。通过融合轨道先验模型与数据驱动模型，可以形成随时间变化的网络拓扑、链路状态和资源状态描述，为路由计算、资源调度和故障恢复提供一致的网络状态视图。

数字孪生进一步将物理承载网中的卫星节点、地面节点、通信链路、网络协议及业务流量映射至虚拟空间，形成物理网络、数据模型和虚拟网络之间的动态关联。物理网络持续产生运行数据，虚拟网络依据感知信息更新自身状态，并对路由调整、资源分配、链路切换和故障处置等策略进行仿真验证。验证结果可作为承载网管控决策的参考，从而形成“状态感知—模型更新—仿真推演—决策评估”的技术闭环。数字孪生主要用于网络规划、方案验证、运行分析和故障推演，不直接替代物理网络中的实时控制机制。

在关键指标与适用条件方面，网络感知重点关注测量准确性、状态完整性、信息新鲜度、采集周期和测量开销；网络建模重点关注拓扑预测准确率、链路状态估计误差、业务负载预测误差以及模型更新效率；数字孪生重点关注虚实状态一致性、同步时延、模型保真度、

仿真速度和计算资源消耗。对于拓扑变化具有明确周期性的网络，可适当延长全量状态采集周期，并利用轨道预测补充网络状态；对于突发业务、高动态链路或应急保障场景，则需要缩短关键状态更新周期，提高局部网络的感知粒度。星上资源受限时，应优先采集对路由和业务保障影响较大的状态信息，并在星上完成必要的聚合与筛选，避免全量原始数据集中回传造成额外承载压力。

该技术仍面临多方面难点。一是超大规模星座产生的多源异构数据规模庞大，难以在有限链路和星上资源条件下实现高频、全量采集；二是网络状态在采集、传输和处理过程中存在时延，容易造成感知结果与实际网络状态不一致；三是轨道运行规律与随机信道、突发流量和设备故障相互叠加，增加了统一建模和准确预测的难度；四是高保真数字孪生需要在模型精度、仿真速度和计算开销之间进行权衡。

其发展方向主要包括面向星上资源约束的轻量化状态采集、基于重要性和事件触发的自适应测量、融合轨道先验与数据驱动方法的网络建模、面向千星万星星座的分层分域状态汇聚，以及物理网络与数字孪生网络之间的低开销同步。通过提升网络状态的可观测性、模型描述的一致性和虚拟验证的可信度，为卫星互联网承载网的路由、调度、运维和故障处置提供准确、及时的技术依据。

3.7 承载网安全与可信保障技术

卫星互联网承载网安全与可信保障技术旨在保障星间、星地及地面骨干承载网络中数据、控制指令和网络节点的机密性、完整性、可

用性与可信性。与地面网络相比，卫星互联网具有链路空间暴露、拓扑高速变化、节点跨域互联、星上资源受限以及在轨维护困难等特点，面临链路窃听与伪装、控制指令篡改、星上软硬件完整性破坏、异常节点横向渗透、分布式拒绝服务攻击以及路由欺骗与劫持等安全风险。一旦星载节点或控制链路受到攻击，风险可能沿星间链路、星地链路和地面骨干网络扩散，进而引发路由振荡、业务中断和大范围服务失效。因此，需要构建覆盖“端—星—站—网—云”的纵深防御体系，实现链路可信接入、节点可信运行、行为持续监测、攻击协同防护和网络快速恢复。

在基本原理与实现机制方面，首先应在星间和星地链路中建立双向身份认证、动态密钥协商与更新、数据加密和防重放机制，对业务数据、路由报文及管控指令实施差异化保护，防止非法节点接入以及信息窃听和篡改。其次，面向星载路由器、交换机和网络操作系统，应依托硬件可信根、可信启动、固件与配置签名、远程可信证明及运行时完整性监测等机制，验证星上软硬件及协议组件的可信状态。再次，可综合利用网络遥测、流量特征、路由变化和节点行为信息，结合规则匹配、统计分析与智能检测方法，识别异常流量、异常路由和失陷节点。针对分布式拒绝服务攻击，可在终端接入、信关站和骨干网入口实施源身份验证、访问控制、流量限速、分级过滤和地面清洗，并通过星地协同调度避免攻击流量持续占用稀缺星上资源。针对路由安全，应对路由更新消息实施来源认证、完整性校验、序列号或时间戳验证，并结合多路径验证、异常路由隔离和可信路由恢复机制，降

低虚假路由发布、路由劫持及恶意绕行造成的影响。

承载网安全与可信保障技术的关键指标主要包括身份认证成功与认证时延、密钥更新时延、加密处理吞吐量及其资源开销、星上完整性验证覆盖率、异常检测准确率与误报率、攻击发现和处置时延、分布式拒绝服务攻击防护能力、异常路由识别率、路由恢复与收敛时间以及受攻击条件下的业务可用性。不同网络环境对安全机制的要求存在差异：高速星间链路需要采用低时延、低功耗且支持线速处理的加密认证机制；星地融合网络需要解决卫星网络、运营商网络和行业专网之间的身份、密钥及安全策略协同问题；超大规模星座需要采用分布式、轻量化的异常检测与安全状态同步机制；手机和物联网终端大规模直连场景则更加关注海量身份认证、突发接入控制和抗分布式拒绝服务能力。对于应急通信、国防安全和重大行业专网，还需进一步强化端到端加密、最小权限访问、可信度量及多链路冗余保障。

当前，卫星互联网承载网安全仍面临多方面技术难点。一是星上计算、存储和能源资源有限，传统复杂安全机制难以直接部署，安全能力与转发性能之间存在明显矛盾；二是星座拓扑和星地连接关系持续变化，密钥更新、信任状态同步及安全策略下发容易受到链路间歇连接和长时延影响；三是星载设备、地面网络和行业专网采用的协议、设备及管理体系差异较大，跨域身份互认和安全策略一致性难以保障；四是超大规模星座产生的网络状态和安全事件数量快速增长，对异常检测的实时性、准确性和可扩展性提出更高要求。未来应重点发展面向卫星互联网的轻量化密码与密码敏捷技术、星上可信计算与远程证

明、零信任接入、可编程数据面安全防护、星地协同智能检测以及数字孪生驱动的攻击推演与验证技术，推动安全能力由外围附加防护向网络内生安全演进，逐步形成“身份可信、节点可信、链路可信、行为可测、风险可控、故障可恢复”的承载网安全与可信保障体系。

3.8 测试验证与性能评估技术

卫星互联网承载网的部署成本高昂，且一旦部署后修改难度极大，同时空间环境复杂多变，难以在地面完全复现，因此仿真与验证技术在卫星互联网承载网的研发过程中具有至关重要的作用，它贯穿于从概念设计到在轨运行的全生命周期，是保障系统性能、降低部署风险的关键环节。在仿真方法上，需要根据卫星互联网网络的多维度特性，采用不同的仿真手段：

- 系统动力学仿真：主要用于模拟卫星的轨道力学特性，包括卫星轨道的衰减、空间碎片碰撞的 Kessler 效应等，评估星座长期运行的稳定性。通过建立精确的卫星轨道模型和空间环境模型，能够仿真卫星在不同轨道上的运行状态，预测卫星的轨道变化和寿命。同时，通过建立卫星姿态控制模型，分析卫星姿态变化对波束指向和链路质量的影响，为卫星的姿态控制系统设计提供依据。例如，在仿真 LEO 卫星星座时，系统动力学仿真能够模拟卫星在大气层阻力、引力摄动等因素影响下的轨道变化，评估星座的轨道维持成本和长期运行的稳定性。
- 离散事件仿真：重点关注通信协议的性能验证，如路由算法的收

敛速度、移动切换机制的中断时间等。常用的仿真工具包括 MATLAB/Simulink（主要用于链路级仿真）和 OPNET/NS3（主要用于系统级仿真）。通过构建网络拓扑模型、业务流量模型和协议模型，能够仿真不同协议在卫星互联网网络环境下的运行性能。例如，在仿真 LEO 星座的星间链路动态拓扑时，离散事件仿真能够模拟卫星的运动导致的星间链路连接和断开，评估分布式路由协议在这种动态拓扑环境下的收敛速度和数据包传输效率。

- **多智能体仿真：**用于模拟卫星节点的自主决策与协同行为，如基于博弈论的频谱共享策略、分布式资源竞争机制等，评估大规模星座的协同效率。在多智能体仿真中，每个卫星节点被视为一个智能体，具有自主决策能力和与其他节点的交互能力。通过定义智能体的行为规则和交互协议，能够仿真卫星节点之间的协同工作过程，分析不同策略对网络性能的影响。例如，在仿真卫星的频谱共享时，多智能体仿真能够模拟不同卫星节点根据自身的业务需求和频谱使用情况，通过博弈论的方法进行频谱资源的分配，评估这种分布式频谱共享策略的效率和公平性。

验证手段方面，需要构建“虚实结合”的验证体系，以确保仿真结果的准确性和可靠性：

- **硬件在环（Hardware-in-the-Loop, HIL）测试：**将实际的卫星终端、调制解调器等硬件设备接入虚拟的仿真环境，验证设备在复杂场景下的工作性能。SERENADE 硬件在环仿真器是典型的 HIL 测试工具，它支持多波束信道仿真、非线性放大器建模等功能，实时

处理延迟控制在 1ms 以内，能够复现大气衰减、多普勒频偏等真实的链路特性。通过 HIL 测试，能够在实验室环境下模拟卫星与地面设备之间的通信过程，测试设备的性能和兼容性，发现设备在实际运行中可能出现的问题。

- **星地联合测试：**通过地面站与在轨卫星的协同试验，验证端到端的网络功能。例如，5G-NTN 验证平台（如 SATis5 项目）集成了 SDN 控制器，通过星地联合测试，能够演示网络切片在卫星-地面一体化场景中的可行性，验证 5G 技术与卫星网络的融合性能。星地联合测试能够充分利用在轨卫星的实际运行环境，获取真实的测试数据，为卫星互联网网络的技术验证和优化提供有力支持。
- **IOT：**利用实际在轨运行的卫星开展技术验证，获取真实空间环境下的性能数据。例如，欧洲数据中继系统的激光链路测试，通过在轨卫星之间的激光通信试验，验证了激光链路在空间环境下的传输性能，为激光链路技术在卫星互联网网络中的应用提供了重要的参考依据。在轨验证是最接近实际运行环境的验证手段，能够有效验证新技术、新方案的可行性和可靠性。

未来，卫星互联网承载网的仿真与验证技术将呈现以下几个重要的发展趋势：

- **高保真度：**不断提升仿真模型的精细度，更加精确地模拟大气湍流、雨衰、硬件非线性等物理特性，缩小仿真结果与实际情况的差距。通过引入更先进的物理模型和数值计算方法，提高仿真的准确性和可靠性，使仿真结果能够更好地指导实际的系统设计和

优化。

- **大规模：**支持超万颗卫星的星座级仿真，能够评估巨星座的网络拥塞、干扰协调等问题。随着卫星星座规模的不断扩大，传统的仿真工具和方法难以满足大规模星座的仿真需求。未来的仿真技术需要具备更强的计算能力和并行处理能力，能够高效地仿真大规模星座的运行状态，为巨星座的设计和优化提供支持，如 Starlink 的大规模路由策略验证。
- **智能化：**引入人工智能驱动的自动化测试，通过机器学习算法自动生成测试用例，提高测试的效率和覆盖率。同时，利用数字孪生技术构建“虚实交互”的验证环境，将物理卫星与虚拟卫星模型实时关联，实现对卫星运行状态的实时监测和仿真预测。这有助于加速新技术从概念到应用的转化，提高卫星互联网网络的研发效率。

国际标准化组织也在积极推动仿真工具的规范化，如 ITU 的 EPFD 计算软件、ESA 的星座干扰分析器等，为频谱协调和系统兼容设计提供了标准化的验证手段，促进了卫星互联网承载网仿真与验证技术的统一和发展。这些标准化的工具和方法，有助于提高不同仿真和验证结果的可比性和一致性，推动卫星互联网网络技术的标准化和产业化进程。

四、卫星互联网承载网产业体系与发展

卫星互联网承载网产业围绕星间、星地及地面骨干承载网络建设形成，涵盖核心芯片与基础器件、星载承载网设备、星地融合承载设备、网络系统与管控平台、协议与软件生态、测试验证以及运营服务等环节。从产业链分工看，可将上述七个产业板块归纳为三个层次：上游主要包括芯片、器件、光电模块和基础软件；中游主要包括星载路由交换设备、星地融合网关、网络操作系统、管控平台和测试仪表；下游主要包括卫星运营商、地面运营商、云服务商以及航空、海事、应急、低空、能源等行业应用与服务。

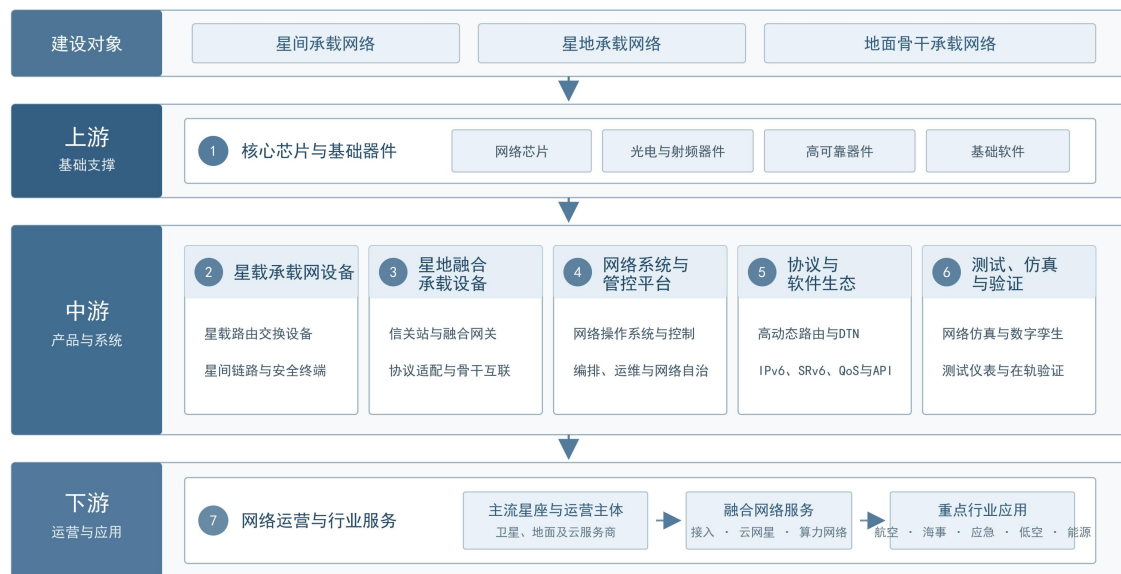


图 4-1 卫星互联网承载网产业体系图

4.1 核心芯片与关键器件

核心芯片与关键器件位于卫星互联网承载网产业链上游，是支撑

星载路由交换、星间高速互联、星地数据传输和地面骨干接入的基础。与地面网络器件相比，星载芯片和器件不仅需要满足高速处理和大容量传输要求，还受到功耗、体积、重量、散热及空间辐射环境等多重约束，其性能和供给能力直接影响承载网设备的处理容量、运行可靠性以及规模化部署成本。

在网络处理方面，相关产品主要包括星载和地面交换路由芯片、现场可编程门阵列（FPGA）、网络处理器（NP）及系统级芯片（SoC）等。地面交换路由芯片主要面向信关站、星地融合网关和地面骨干节点，强调高吞吐量、大容量转发和协议兼容能力；星载交换路由芯片则需要在有限功耗和计算资源条件下完成报文处理、路由查表、队列调度和状态维护，并适应卫星高速运动引起的拓扑变化及链路切换。FPGA 具有可重构和适应性强等特点，适用于协议验证、功能升级和专用数据处理；网络处理器和 SoC 则通过集成处理、交换及接口功能，满足星载设备小型化、低功耗和高集成度需求。

在高速互联和通信器件方面，主要包括高速串行器/解串器（SerDes）、光模块、激光器、探测器以及捕获、对准和跟踪相关器件等。高速 SerDes 承担芯片之间及板卡之间的数据互联，是提升星载路由交换设备内部带宽的重要基础；光模块和激光通信器件用于构建高速星间链路及星地光通信链路，其传输速率、功耗、灵敏度和工作稳定性直接决定空间骨干链路的承载能力。随着卫星互联网业务容量增加，高速光电器件需要进一步兼顾传输性能、器件集成度、空间适应性及批量制造能力。

射频与毫米波器件主要服务于星地链路、用户链路及部分星间链路，包括功率放大器、低噪声放大器、变频器、滤波器和相控阵相关器件等。此类器件需要在宽频段、高动态和复杂电磁环境下保持稳定工作，并兼顾频谱利用效率、能耗和终端尺寸。面向多频段、多波束和大容量星地传输需求，射频前端的高集成、低功耗和宽带化能力成为影响系统覆盖范围及服务容量的重要因素。

高可靠存储、时钟同步和抗辐照器件共同构成承载网设备稳定运行的基础保障。高可靠存储器用于保存路由表、协议状态、运行日志和缓存数据，需要降低单粒子翻转等空间环境因素对数据完整性的影响；高精度时钟及同步器件为链路协同、时隙调度、数据转发和网络测量提供统一时间基准；抗辐照、高可靠网络芯片则需要通过容错设计、冗余保护和可靠性验证，保证承载网设备在轨长期运行期间的功能连续性。

从产业发展看，地面通信芯片和通用光电器件已具备较为成熟的产业基础，但直接用于星载环境仍需完成低功耗改造、抗辐照设计和空间环境适应性验证。部分高性能交换路由芯片、高速 SerDes、空间级光电器件以及抗辐照器件还面临研发投入大、验证周期长和规模效应不足等问题。随着卫星星座由试验验证向规模化组网发展，上游产品需求将由少量定制逐步转向系列化、模块化和批量化供给，对产品一致性、可测试性和供应链稳定性提出更高要求。

因此，核心芯片与基础器件环节应重点提升自主可控、低功耗、高可靠和星载适应能力，统筹地面成熟技术复用与空间专用产品研制，

完善从设计、制造、封装到测试验证的协同体系。同时，应加强关键接口和器件规格的标准化，推动芯片、光电模块及射频器件与星载承载设备协同设计，为卫星互联网承载网规模建设提供稳定、可持续的上游基础。

4.2 星载承载网设备

星载承载网设备位于卫星互联网产业链中游，是将卫星由通信载荷转变为网络节点的关键环节，主要包括星载路由器、星载交换机、星间链路终端、星载网关与协议转换设备、星载时间同步设备以及星载网络安全设备等。其核心作用是连接用户链路、馈电链路和星间链路，在轨完成数据汇聚、转发交换、协议适配和运行保障，使业务流量能够跨卫星、跨轨道及跨星地网络传输。

星载路由器和星载交换机承担星间数据转发与星内高速互联功能。星载路由器主要根据网络拓扑、业务类型和链路状态完成路径选择、报文转发及服务质量保障；星载交换机主要连接通信载荷、星间链路终端、星载计算载荷和卫星平台设备，实现星内不同功能单元之间的数据交换。两类设备在功能上逐步融合，形成集路由、交换、缓存、队列调度和运行状态管理于一体的星载路由交换设备。与地面设备相比，此类产品需要在功耗、重量和空间有限的条件下，适应辐射、温度变化和链路频繁切换，并满足长期在轨运行的可靠性要求。

星间链路终端负责在卫星之间建立高速通信链路，包括激光通信终端和微波通信终端。其中，激光通信终端通常由光学天线、激光收

发、捕获对准跟踪、信号处理和链路控制等模块组成，是构建低轨星座空间骨干网的重要设备。星载网关与协议转换设备主要用于完成不同链路、协议和业务体系之间的适配，支持卫星网络与地面 IP 网络、移动通信网及行业专网互联。星载时间同步和网络安全功能目前多以板卡、处理单元或软件模块的形式集成于通信载荷及路由交换设备中，独立设备形态尚不普遍，但随着网络节点功能增强，其产品边界将逐渐清晰。

从系统实现看，星载承载设备主要形成透明转发、星上处理和星上路由交换三种技术路线。

表 4-1 星载承载网设备技术路线对比

技术路线	星上主要功能	主要优势	主要约束	适用场景
星上透明转发	对信号进行接收、放大、变频和转发，网络处理及路由控制主要在地面完成	星上结构相对简单，功耗和算力需求较低，工程成熟度较高	依赖地面信关站，跨区域业务可能需要多次落地，全球连续承载和自主恢复能力有限	中小规模系统、地面信关站覆盖较完善的区域通信及传统卫星通信业务
星上处理	在星上完成解调、译码、再生、波束交换、业务识别	可提高链路利用效率，减少部分星地交互，支持更灵活的波束和资源调度	星上处理、存储和能源需求增加，软硬件复杂	5G NTN 再生模式、区域宽带覆盖、物联网

技术路线	星上主要功能	主要优势	主要约束	适用场景
	或部分协议处理，路由与控制仍以地面为主		度及在轨升级要求提高	接入及多业务融合场景
星上路由交换	在星上完成报文交换、路径选择、QoS 调度及星间多跳转发，并与地面控制系统协同	支持空间网络自主组网，减少对信关站的依赖，提高全球承载效率、网络韧性和故障绕行能力	对芯片性能、存储容量、控制机制、安全防护及可靠性提出更高要求	具有星间链路的大规模低轨星座、全球宽带服务和高可靠专网
混合部署	不同卫星或不同功能分别采用透明转发、星上处理和路由交换	可在系统能力、建设成本和星上资源之间取得平衡	需要解决多类型节点协同、协议兼容和统一管控问题	多轨协同星座及分阶段建设的卫星互联网系统

上述三种路线不是简单的替代关系。透明转发具有较低的星上实现复杂度，星上处理强化了载荷对业务和链路的适应能力，星上路由交换则使卫星具备较完整的网络节点功能。实际星座可根据卫星规模、轨道层次、业务范围和建设阶段采用混合部署方式，例如由部分骨干

卫星承担路由交换和跨域转发功能，其他卫星承担接入与透明传输功能。

从国内供给情况看，传统航天科研生产单位、通信设备企业和商业航天企业均开始布局星载承载设备，产业形态正由任务定制研制向型号化产品和批量交付转变。

表 4-2 星载承载网设备产业形态对比

代表性单位	公开产品或进展	对应设备及技术路线	产业特点
航天恒星科技有限公司	EP-1A 型星载路由交换机已通过用户验收并进入相关产品名录	星载路由器、星载交换机；星上路由交换	依托航天工程研制和质量保障体系，侧重高可靠、任务适配和工程应用
星移联信	已公开 100 Gbit/s 星载路由考核试验，并交付 SR200A、SR200B、SR200C 等星载路由产品	星载路由器；星上路由交换	面向商业星座和星间高速互联，强调产品迭代、模块化及批量交付
上光通信、极光星通、蓝星光域等	已形成面向不同轨道和链路距离的星载激光通信终端或相关产品系列	星间链路终端；支持星间光组网	聚焦光机电一体化、捕获对准跟踪和高速激光收发，商业化主体数量增长较快

代表性单位	公开产品或进展	对应设备及技术路线	产业特点
震有科技等通信设备企业	布局星载用户面功能、轻量化星载核心网和星地协同调度产品	星载网关、协议转换及星上处理设备	侧重将地面移动通信协议栈、核心网功能和软件化能力向星上迁移
中国星网及相关研究单位	主要承担卫星互联网总体设计、系统建设、网络组织和应用服务等任务	系统需求牵引、网络总体设计与集成验证	处于星座建设运营和系统牵引位置；

国际方面，星载承载设备已形成星座运营商垂直集成与专业设备厂商供货并行的产业模式。SpaceX 围绕 Starlink 构建卫星、星间激光终端和网络系统一体化能力，其激光通信终端已在大规模星座中应用，体现了运营商自主设计并通过规模部署持续迭代的模式。Amazon Leo（原 Project Kuiper）采用自主设计的光学星间链路系统，原型卫星已验证 100 Gbit/s、约 1000 km 距离的星间光链路，代表大型科技企业依托云网资源开展软硬件协同设计的路线。Telesat Lightspeed 规划采用星载数字信号处理、星地数据路由和光学星间链路，形成空间二层网络，并引入专业网络编排平台完成动态路径组织。TESAT 等企业则以标准化激光通信终端及通信载荷设备为主要产品，体现专业设备供应商服务多个卫星平台和星座项目的产业模式。

总体来看，星载承载网设备正在由单一通信载荷向综合网络设备演进。其产业发展重点不只是提高单机转发速率，还包括形成稳定的设备接口、统一的链路协议、可升级的软件体系以及面向批量生产的测试验证能力。随着卫星数量增加，星载路由器、交换机和链路终端需要进一步实现小型化、低功耗、标准化和系列化，时间同步、安全防护及协议转换等功能也将由分散模块逐步融入统一的星载网络设备体系。

这一演进将使卫星不再只是对无线信号进行透明转发的通信载荷，而是成为能够识别业务、交换数据、选择路径并参与网络协同的在轨节点。与此同时，星上功能增加也会带来设备功耗、软硬件可靠性、在轨维护和安全防护等方面的压力。因此，产业发展需要在星上处理能力与系统复杂度之间合理权衡，并通过模块化设备、开放接口、统一标准和在轨可升级设计，支撑卫星互联网承载网由工程定制向规模化网络基础设施转变。

4.3 星地融合承载设备

星地融合承载设备位于卫星互联网空间网络与地面通信网络的交界处，是实现卫星业务落地、流量汇聚和跨网传输的关键环节，主要包括信关站网络设备、卫星互联网边缘路由器、星地融合网关、5G核心网互通设备、协议适配设备以及卫星网络与运营商骨干网互联设备等。其核心任务是将来自星间和星地链路的业务流量接入地面互联网、移动通信网、云数据中心和行业专网，并完成协议转换、地址组

织、服务质量映射、安全隔离及跨域路由。

与星载设备相比，星地融合承载设备对体积、功耗和空间环境适应性的约束相对较弱，可以较充分地复用地面通信产业已有的高性能路由交换、移动核心网、云计算和网络安全技术。与此同时，卫星链路具有时延跨度大、带宽波动明显、连接关系动态变化和覆盖区域跨域等特点，相关设备不能简单照搬地面网络产品，还需要增强多轨卫星接入、动态链路适配、跨信关站切换和星地业务协同能力。

信关站网络设备是星地业务流量进入地面网络的首个汇聚节点，通常包括基带处理设备、网关路由器、交换机、时钟同步设备、安全设备和网络管理单元。传统信关站多由若干独立设备组合建设，系统集成和运维较为复杂；面向大规模低轨星座，信关站设备正向基带、协议处理、交换路由和网络管理一体化方向发展。卫星互联网边缘路由器则部署于信关站出口、运营商边缘节点或卫星网络接入点，负责将星地流量接入 IP 骨干网、城域网和云数据中心，并提供 VPN、流量工程、服务质量保障及故障保护等功能。

星地融合网关和核心网互通设备主要解决卫星通信体制与地面移动通信体制之间的衔接问题。对于采用传统卫星通信协议的系统，网关需要完成卫星链路协议与 IP、以太网及专网协议之间的转换；对于采用 5G NTN 体系的系统，网关及相关网络功能需要支持卫星接入网与 5G 核心网之间的标准接口，并完成用户认证、会话管理、移动性管理、QoS 映射和用户面数据转发。6G NTN 目前仍处于研究和标准形成阶段，相关设备主要体现为面向多轨协同、天地统一接入和通

算融合的架构预留，尚不宜作为已经成熟定型的产品体系进行描述。

从承载协议和系统组织方式看，星地融合承载设备主要形成 IP/MPLS、SRv6、5G/6G NTN 互通以及云网星融合等技术路线。

表 4-3 星地融合承载设备技术路线对比

技术路线	主要实现方式	主要优势	主要约束	适用条件
IP/MPLS 承载	在信关站、边缘路由器与运营商骨干网之间采用 IP/MPLS、VPN 和流量工程机制组织业务	技术成熟、设备和运维体系完善，便于复用运营商现有网络，可提供较稳定的专线与 QoS 保障	协议层次和控制体系相对复杂，跨域配置及大规模动态路径调整的灵活性有限	现有运营商骨干网接入、固定信关站互联和政企专网承载
SRv6 承载	以 IPv6 地址和段标识表达节点、链路及网络功能，实现跨域路径编排和业务引流	协议体系相对简化，具备可编程性，便于打通卫星网络、承载网、云和业务平台	报文封装开销、异构设备兼容及跨域策略一致性仍需处理，卫星链路适配需要专门验证	IPv6 规模部署、云网协同、跨域业务编排和新建星地融合承载网络
5G NTN 互通	依据 3GPP NTN 架构衔接卫星接入网与	可复用地面移动通信标准、	需要适应长时延、大范围小	IoT NTN、NR NTN、手机直

技术路线	主要实现方式	主要优势	主要约束	适用条件
	5G 核心网，实现统一认证、会话、移动性和 QoS 管理	终端和核心网体系，适合手机直连卫星及卫星物联网	区、频繁切换及非连续覆盖，核心网和信关站功能需相应增强	连卫星以及移动运营商融合组网
6G NTN 融合	面向天地统一网络架构，对多轨卫星、地面网络及高空平台进行统一连接和能力组织	有利于形成天地一体的网络标识、业务控制和资源协同体系	标准、产品和商业模式尚未成熟，当前主要处于研究与验证阶段	面向 6G 的试验网络和架构预研
云网星融合	将信关站功能、网络控制和协议处理进行软件化、虚拟化，在边缘云或中心云中弹性部署	便于按需扩容和集中运维，可将卫星连接与云服务、算力和数据处理能力直接结合	对云基础设施可靠性、跨域编排、安全隔离和数据合规提出较高要求	大规模星座运营、云服务接入、遥感数据处理和算力网络
TSN/确定性网络适配	在工业专网边界完成 TSN、DetNet 与卫星	可将卫星链路纳入工业控制、能源和交	卫星时延和链路波动较大，难以直接满足	远程工业监测、非实时控制及经过业务

技术路线	主要实现方式	主要优势	主要约束	适用条件
	承载网络之间的业务 映射和时延保障	通等确定性业务体系	所有端到端确定性要求	分级后的行业 专网场景

不同路线之间并非相互排斥。IP/MPLS 适合承接既有网络和存量业务，SRv6 适合构建面向 IPv6 和云网协同的新型承载体系，5G NTN 侧重卫星接入与移动核心网的标准化融合，云网星融合则进一步将卫星连接转化为可调用、可编排的网络和云服务。实际部署可在信关站至骨干网段采用 IP/MPLS 或 SRv6，在卫星接入与核心网之间采用 5G NTN 接口，并通过云化平台完成跨域业务编排。

从国内产业供给看，华为、中兴等综合通信设备企业的能力优势主要集中在地面承载、核心网、SRv6 和云网协同领域，更适合归入星地融合承载设备环节，而不宜在缺少公开产品依据时将其直接认定为星载路由器厂商。与此同时，传统卫星通信企业、软件企业和商业航天企业正在围绕一体化信关站、卫星核心网及多轨接入形成专业产品。

表 4-4 星地融合承载设备产业形态对比

代表性单位	公开产品与能力	可承担的产业环节	产业定位
华为	NetEngine 系列路由器支持 IP/MPLS、SRv6、EVPN、网络切片和高精度时间同步	信关站出口路由、卫星互联网边缘	具备成熟的运营商级承载设备和 SRv6 体系，可为星地融合提供地面

代表性单位	公开产品与能力	可承担的产业环节	产业定位
	步，iMaster NCE 提供跨域管理控制与业务编排能力	路由、骨干网互联及云网接入	网络底座；卫星专用功能仍需结合具体项目进行适配
中兴通讯	ZXR10 M6000 系列路由器和 ZENIC ONE 平台支持 SR-MPLS、SRv6、EVPN、SDN 及时间同步，并已形成基于 3GPP 标准的 5G NTN 解决方案	信关站网络、运营商骨干互联、5G 核心网互通和云网协同	同时具备 IP 承载、移动核心网和 NTN 验证能力，适合提供从卫星接入到地面骨干网的融合方案
长江通信等中国信科相关企业	已公开一体化信关站、低轨卫星星座网络控制系统等产品，并披露信关站项目应用	信关站建设、地面系统集成和网络控制	侧重卫星地面系统、设备集成及项目建设，具有较强的专用信关站工程属性
震有科技及南京有维星通	布局 KW 系列基带、一体化信关站、卫星核心网及光传输设备	基带处理、协议转换、核心网互通和地面承载	强调“核心网—信关站—光传输”一体化供给，适合卫星专网和综合地面站建设
亚信科技	已发布兼容 DVB、NTN 以及透明转发、星上处理架	卫星核心网、移动性	侧重软件化核心网、业务管理和运营支撑，体

代表性单位	公开产品与能力	可承担的产业环节	产业定位
	构的卫星地面核心网产品	管理、网络切片及星地业务互联	现通信软件企业向卫星地面网络延伸的路径
卫星与地面运营商	建设卫星网络接入点、骨干网和云资源池，并负责跨域网络组织和服务运营	系统集成、网络互联和运营管理	既是设备采购方，也是星地融合网络架构、接口和服务模式的主要定义者

国际市场已形成较成熟的专业卫星地面系统供应商。Hughes 的 JUPITER System 覆盖卫星网关、终端、IP 路由和网络管理，采用软件定义、5G 就绪和云化设计，面向宽带接入、蜂窝回传、航空及海事通信等场景。Gilat 的 SkyEdge IV 平台支持 GEO、MEO 和 LEO 多轨网络，提供软件定义调制解调、二层和三层业务、多轨切换及云原生网络管理能力。Kratos 的 OpenSpace 则以虚拟化和软件定义地面系统为重点，将传统专用硬件功能迁移至通用服务器和云平台，并通过统一编排支持多任务和多轨卫星网络。国际厂商的产品路线表明，信关站正在由封闭、专用的硬件系统转向开放、软件化和云化的网络基础设施。

总体来看，星地融合承载设备具有设备数量多、部署区域广、更新周期短和通用通信技术复用程度高等特点，产业规模不仅取决于信

关站数量，还包括卫星网络接入点、边缘节点、骨干网扩容、核心网升级和云平台建设等持续需求。相比星载设备，其供应主体更加多元，既包括卫星通信专业厂商，也包括路由交换设备商、移动核心网厂商、云服务商和系统集成商。

该环节的发展重点是推动卫星专用接口与地面标准协议协同，形成可兼容多轨星座、多种卫星通信体制及不同运营商网络的设备体系。通过完善 IP/MPLS 与 SRv6 承载、5G NTN 核心网互通、云化信关站和确定性业务适配能力，逐步实现卫星网络与地面互联网、移动通信网、行业专网和云计算平台之间的统一连接与差异化服务保障。

4.4 卫星网络系统与管控平台

卫星网络系统与管控平台承担全网资源感知、控制决策、业务编排和运行维护等功能，是连接星载设备、星地链路、地面承载网络与业务系统的核心枢纽，可视为卫星互联网承载网的“网络大脑”。与传统卫星测控系统主要面向卫星平台状态监测和任务控制不同，卫星互联网承载网管控平台需要面向通信网络运行，统一管理卫星节点、星间链路、星地链路、波束、频谱、路由和业务等资源，并根据星座拓扑变化和业务需求，完成路由计算、流量工程、网络切片、故障处置和服务质量保障。

从产品构成看，卫星网络系统与管控平台通常包括四类功能。一是资源接入与状态感知，通过遥测、网络遥测和设备接口采集卫星位置、链路质量、端口状态、业务流量及故障告警等信息，形成全网资

源视图；二是网络控制与策略计算，依托 SDN 控制器、路径计算单元和策略引擎，完成拓扑管理、路由控制、链路调度和流量工程；三是业务编排与能力开放，根据业务等级和服务质量要求，对网络连接、带宽、切片及安全策略进行自动配置，并通过标准化接口向运营和行业应用系统开放网络能力；四是智能运维与自治管理，结合数字孪生、人工智能和知识库，实现网络状态预测、异常检测、故障定位及闭环优化。

从国内产业主体看，目前主要形成了卫星系统与专用软件企业、星座建设运营主体以及地面通信设备厂商三类参与者。中国星网及其相关单位主要承担卫星互联网系统总体设计、星座建设运营和跨域资源协同，处于管控平台的需求牵引和系统集成环节。中国卫通等卫星运营商拥有在轨卫星、地面站网和长期运行维护基础，其平台建设重点在于卫星资源、地面设施、业务系统与运营流程的统一管理。中国东方红卫星股份有限公司公开的卫星通信能力包括一体化卫星综合网管和 Anovo 卫星通信系统，体现了从卫星通信设备向系统集成和综合网管延伸的发展路径。中国东方红卫星股份有限公司等企业则面向低轨星座布局测运控软件、一体化信关站和宽带低轨卫星星座网络控制系统，具有较强的专用系统集成属性。

科研创新与工程验证平台也是国内卫星网络管控技术发展的重要力量。紫金山实验室未来网络中心空间卫星网络课题组围绕软件定义卫星互联网组网开展研究，已研制自主卫星网络操作系统和卫星网络试验平台，并参与卫星互联网技术试验卫星网络通信体制及关键工

程系统研制。紫金山实验室相关平台主要面向高动态拓扑建模、星间路由控制、网络状态感知和管控策略验证，可为承载网控制算法、网络协议和星地协同机制提供试验环境。随着国内卫星互联网进入百星级组网和运行阶段，此类平台正由单星、少星和仿真验证向面向百星级及以上星座的系统验证演进，并进一步研究适应千星、万星规模的分层分域控制、路由快速收敛和网络自治机制。虽然此类科研平台尚不完全等同于商业化管控产品，但其在核心算法、网络操作系统、试验验证和成果转化方面具有重要的技术源头作用。

华为、中兴等地面通信设备厂商的优势主要集中在运营商级 SDN 控制器、IP 与光网络协同控制、路径计算和智能运维领域。华为 iMaster NCE-IP 已具备基于 Telemetry 和 BGP-LS 的网络状态采集、SDN 路径计算、SRv6 网络编程、网络切片及闭环运维能力；中兴 ZENIC ONE 可作为路径计算单元，实现拓扑发现、跨域路径计算和 SRv6 路径计算。华为 iMaster NCE-IP、中兴 ZENIC ONE 这些产品可用于卫星信关站、地面骨干网以及星地互联部分的统一管控，并可作为星地协同控制器的技术基础。但是，其现有公开能力主要面向地面网络，要进一步应用于超大规模卫星互联网，还需增强对轨道运动、高动态拓扑、断续链路、波束与频谱资源以及星上计算约束的建模和控制能力。因此，不宜将通用地面 SDN 控制器直接等同于成熟的卫星网络操作系统。

国际市场已经出现一批专门面向卫星网络软件化和星座管控的企业。Aalyria 的 Spacetime 平台侧重多域网络建模、链路调度、动态

路由和频谱资源编排，Telesat 已选择该平台用于 Lightspeed 低轨星座的网络编排，计划通过分析大量候选路径实现客户流量的动态调度。Telesat 与 OpenSpace 采用虚拟化、云原生和软件定义架构，重点面向卫星地面系统的网络功能编排和自动化服务部署。Kratos 通过 InterMission 和 MAX 等产品提供任务运行、卫星控制和星座管理能力；AWS Ground Station 则采用“地面站即服务”模式，为卫星通信、接触计划和数据处理提供云化支撑。Rocket Lab InterMission、AWS Ground Station 此外，以 Starlink 为代表的星座运营商主要采用垂直整合、自主运营的封闭式平台，相关系统服务于自身星座，尚未形成面向外部市场的通用独立产品。

总体来看，国内外厂商在卫星网络系统与管控平台领域形成了不同的能力侧重。

表 4-5 卫星网络系统与管控平台对比

厂商类型	代表性主体	主要优势	当前局限或发展重点
星座建设与运营主体	星网、垣信、Starlink 等	掌握星座资源、运行数据和业务需求，具备系统级协同条件	国内平台面临规模、成本、应用问题
卫星专用系统企业	中国卫星、长江通信、Aalyria、Rocket Lab 等	熟悉卫星运行约束，具备测运控、星座管理或动态网络编排能力	需进一步验证超大规模星座、多轨协同和多运营商环境下的扩展能力

厂商类型	代表性主体	主要优势	当前局限或发展重点
科研创新与工程验证平台	紫金山实验室、北京邮电大学等	具备卫星网络操作系统、动态路由控制和网络试验验证基础，可支撑面向百星级及以上星座的技术验证	需要加强大规模在轨运行验证、产品化交付和产业生态衔接
地面通信设备厂商	华为、中兴等	具备运营商级 SDN 控制器、路由计算、网络切片和智能运维基础	需要补充卫星动态拓扑、波束频谱和星上资源模型
软件定义地面系统厂商	Kratos 等	虚拟化、云原生和自动化编排能力较强	当前能力更多集中于地面系统，需向星间网络协同控制延伸
云平台服务商	AWS 等	具备全球云基础设施、弹性计算和服务化交付能力	主要解决地面站接入和数据处理，不等同于端到端承载网控制平台

从产品实现看，卫星网络系统与管控平台可采用不同的控制部署方式，其架构分工与选型依据见第二章。本节重点关注相关能力如何形成可部署、可验证和可持续维护的产品，包括设备接入、功能集成、接口适配、运行验证和交付支持等方面。

在产品形态与功能边界方面，卫星网络操作系统侧重节点侧网络

功能及运行环境，控制器侧重拓扑管理、路径计算和策略执行，编排平台侧重跨资源、跨系统的业务配置，运维平台则侧重运行监测、故障处置与服务保障。不同产品可以集成交付，也可以通过接口协同，但需要明确各自管理对象和职责。卫星平台测运控、通信网络管控以及地面站接入服务具有不同的功能范围，不能仅依据“星座管理”或“智能平台”等名称将其视为完整的承载网管控产品。

在设备适配与接口开放方面，平台的工程价值取决于能否接入实际设备并形成可执行的控制能力。南向接口需要支持设备状态采集、配置下发及执行结果反馈；控制器之间的接口需要支撑跨域状态交换与策略协调；北向接口则面向运营和业务系统提供连接、带宽及服务质量等能力。对外部地面网络和云平台，应通过约定接口开展协同，明确管理权限与资源边界。产品评价还应关注协议版本兼容、异构设备适配和接口文档完备程度，避免将接口开放等同于已经实现跨厂商互操作。

在验证规模与工程成熟度方面，应区分方案发布、实验室仿真、半实物验证、在轨试验和实际运营等阶段。对于“百星级”“千星级”等能力描述，需要说明其对应的是模拟节点、接入设备还是实际在轨卫星，并列明业务负载、拓扑变化、故障注入和测试持续时间等条件。平台的可扩展性不仅取决于能够显示或接入多少节点，还应结合状态处理能力、策略生成与下发时延、异常恢复效果及持续运行稳定性进行评价。未公开验证条件的产品，不宜仅依据规划规模判断其成熟度。

在交付与运维保障方面，平台需要具备配置管理、版本升级、权

限控制、审计追踪、备份恢复及故障回退等能力。对引入人工智能的产品，应明确其用于辅助分析、策略推荐还是自动执行，并提供相应的验证记录和运行边界。产业化评价应关注智能功能能否稳定融入既有运维流程，以及发生异常时能否恢复至经验证的控制策略。

总体来看，卫星网络系统与管控平台的产业发展重点，是将拓扑管理、路由控制和资源编排等技术能力转化为经过验证的软件产品与系统服务。国内产业主体可围绕实际星座需求，加强网络操作系统、控制器和编排平台的协同研发，完善接口规范、互操作测试和工程验证记录，推动科研原型向可交付、可维护、可扩展的产品演进。

4.5 承载网协议与基础软件

承载网协议与软件生态位于芯片设备和网络系统之间，是实现不同卫星节点、星间链路、信关站、地面骨干网及管控平台互联协同的基础。与星载路由器、星地融合网关等硬件产品不同，协议与软件通常不以独立设备形态存在，而是嵌入星载网络操作系统、路由交换设备、SDN 控制器、星地融合网关和业务编排平台之中，其产业价值主要体现为技术标准、协议栈、算法组件、软件平台、开放接口和知识产权。协议体系的开放性、兼容性和成熟度，直接影响卫星互联网承载网的设备互通、系统扩展和产业协作能力。

从功能构成看，卫星互联网承载网协议与软件主要包括基础互联协议、动态路由协议、传输与服务保障机制以及跨域协同接口四个层次。

基础互联协议主要解决卫星节点、地面节点和业务网络之间的统一编址与数据转发问题。IPv6 具有大规模地址空间和良好的网络扩展能力,可为海量卫星、信关站和用户终端提供统一的网络层互联基础。SRv6 进一步将路径选择和网络功能编排能力融入 IPv6 数据平面,使控制平台能够根据业务需求指定转发路径、实施流量工程并调用沿途网络功能。对于卫星互联网而言,IPv6 与 SRv6 有助于减少专用协议与地面互联网之间的转换环节,推动卫星网络由相对封闭的通信系统向可编程 IP 承载网络演进。

动态路由协议主要解决卫星高速运动和链路周期性变化条件下的路径计算与转发问题。传统地面路由协议通常依据链路状态变化触发路由更新,而卫星轨道和部分链路变化具有较强的周期性和可预测性,可以结合轨道信息、链路可用时段和业务状态提前生成路由计划。IETF 提出的时间变化路由 (Time-Variant Routing, TVR) 已将卫星网络作为重要应用场景,研究在路由计算中引入时间和计划性拓扑变化,以改善动态网络的路由收敛和转发性能。IETF RFC 9657 在此基础上,高动态路由软件还需支持路由预计算、增量更新、局部修复和分层分域控制,避免大规模星间链路变化引发全网路由震荡。

多路径传输、确定性网络、网络切片和 QoS 机制共同构成承载网的服务保障能力。多路径传输可利用不同星间链路、星地出口和地面路径进行负载分担,并在链路中断或拥塞时实现快速切换;确定性网络通过资源预留、路径约束、队列调度和时延控制,为测控、应急、工业控制等关键业务提供可预测的传输性能;网络切片则在共享承载

基础设施上形成相互隔离的逻辑网络，为公众通信、行业专网和关键任务提供差异化资源配置；QoS 机制根据业务优先级、带宽、时延、抖动和丢包等要求实施分类、调度和拥塞控制。上述机制需要与 4.4 节所述管控平台协同，形成从业务需求识别、网络资源配置到运行质量监测的闭环。

对于深空通信、极区通信以及星地链路长时间不可用等场景，时延容忍网络（Delay/Disruption-Tolerant Networking, DTN）可通过存储、携带和转发机制，在端到端连续路径无法长期保持的条件下提高数据交付能力。Bundle Protocol Version 7 已经由 IETF 形成 RFC 9171，并通过 Bundle Protocol Security 等机制提供完整性和机密性保护。IETF RFC 9171、IETF RFC 9172 DTN 并不用于替代实时 IP 承载，而是作为断续连接环境下的补充协议，与 IP 路由、缓存管理和业务优先级机制共同构成多模式传输体系。

跨域互联协议和网络能力开放接口主要解决卫星网络与地面互联网、移动通信网、行业专网及云平台之间的协同问题。一方面，需要形成统一的网络资源模型、拓扑描述、业务标识和状态信息交换机制，使不同厂商设备和不同运营主体能够识别彼此的网络能力；另一方面，需要通过标准化北向接口和软件开发工具包，将覆盖范围、可用带宽、传输时延、链路状态、切片和安全策略等能力封装为可调用的网络服务。行业应用和云平台无需了解卫星网络的具体转发过程，即可按需申请连接、带宽、服务质量和安全保障，推动卫星承载能力由“设备连接”向“网络即服务”转变。

从产业化形态看，承载网协议与软件可形成以下几类产品和服务：

表 4-6 承载网协议与软件产品和服务对比

协议与软件领域	主要产品形态	主要产业价值
IPv6、SRv6 及基础路由	星载及地面协议栈、路由软件、转发组件	实现统一互联、路径编程和硬件适配
高动态与时间变化路由	路由算法库、拓扑预测组件、控制器应用	支撑高动态星座的路由计算和快速收敛
多路径传输与快速保护	多路径协议栈、流量调度和快速重路由组件	提升链路利用率、传输连续性和故障恢复能力
确定性网络、QoS 与网络切片	策略引擎、资源预留、队列调度和切片管理软件	为不同等级业务提供差异化服务保障
DTN	Bundle 协议栈、缓存管理和存储转发软件	支撑断续连接、长时延及非实时数据传输
跨域互联与能力开放	网关软件、数据模型、API、SDK 及开发平台	降低行业应用接入门槛，促进多运营商和多平台协同
协议测试与认证	一致性测试工具、互操作测试套件和仿真环境	加快产品适配、系统集成和规范部署

目前，IPv6、SRv6、QoS 和部分网络切片技术在地面通信网络中已经形成较成熟的设备、协议栈和控制软件生态，但面向卫星高速运动、链路周期变化和星上资源受限环境的高动态路由、确定性保障及跨域协同仍处于技术验证和工程适配阶段。部分星座采用自有协议和

封闭接口，虽然有利于早期系统快速部署，但容易形成设备绑定和技术生态割裂，不利于多厂商设备互通、跨星座协同以及第三方应用开发。同时，直接将地面网络协议栈移植到星上，还面临处理器性能、存储容量、功耗、空间环境可靠性和软件远程升级安全等约束。

未来，应构建“基础协议—增强机制—开放接口”相互衔接的卫星互联网承载网软件体系：以 IPv6 及兼容地面互联网的路由协议为基础，以高动态路由、SRv6、多路径、DTN、确定性网络和网络切片为增强能力，以统一数据模型、开放 API 和开发工具为生态入口。产业主体可围绕标准必要专利、国产协议栈、星载路由软件、控制器应用、算法组件、SDK、测试工具和平台服务形成多层次商业模式，推动协议成果由论文和标准文本进一步转化为可部署、可验证和可持续演进的软件产品。

国内应重点加强卫星专用协议栈、动态路由算法库、星载网络操作系统组件和网络能力开放平台建设，推进设备厂商、星座运营商、软件企业、高校院所与标准组织协同，形成自主可控的参考实现和互操作验证环境。在保证安全可信和系统可控的前提下，通过开放接口和软件生态吸引行业开发者参与，逐步形成“标准规范牵引、协议软件支撑、平台能力开放、行业应用繁荣”的卫星互联网承载网产业生态。

4.6 测试仪表、仿真与验证

测试仪表、仿真与验证是连接技术研发、设备制造、系统集成和

在轨运营的重要环节。卫星互联网承载网具有星座规模大、拓扑变化快、星间链路频繁切换、在轨维护成本高等特点，许多故障和性能问题难以依靠单机测试或在轨试错发现。随着星座由少量试验星向百星、千星乃至万星规模发展，测试对象将由单一通信载荷和链路设备扩展至星载路由交换设备、星地融合网关、管控平台及端到端承载系统，测试验证也将由研发阶段的功能测试向覆盖“设计仿真—实验室测试—半实物验证—在轨监测”的全生命周期体系演进。

在设计与仿真阶段，卫星网络仿真器主要用于构建轨道、卫星节点、星间链路、星地链路、用户分布和业务流量模型，分析星座覆盖、网络连通性、路由性能和资源利用效率。与地面固定网络仿真不同，卫星网络仿真需要将轨道运动、天线覆盖、链路可见时间、传播时延、多普勒频移及空间环境等因素纳入统一模型，并支持集中式、分布式和混合式路由管控方案的对比验证。Ansys STK 等平台能够提供多域、时变的空间任务建模，并可与网络仿真工具联合分析动态链路条件下的时延、丢包和路由性能。

星座数字孪生平台是在传统仿真工具基础上的进一步发展。该平台通过构建与实际星座持续映射的虚拟网络，将轨道数据、设备状态、链路质量、业务流量和管控策略汇聚到统一模型中，用于网络规划、策略预演、故障复现和运行优化。数字孪生平台不仅要能够展示星座运行状态，还应支持真实协议栈、路由算法和管控系统的接入，并通过在轨数据持续校准模型。对于百星级以上星座，可利用数字孪生环境提前验证路由更新、网络扩容、软件升级和故障处置策略，降低直

接在生产网络中调整配置的风险。

在设备与链路测试方面，需要形成覆盖星载路由器、星载交换机、星间链路终端、信关站设备和星地融合网关的测试仪表体系。路由器和交换机测试仪通过生成不同速率、报文长度和业务模型的测试流量，测量设备吞吐量、转发时延、时延抖动、丢包率、缓存能力和并发流表规模。流量发生器还应支持突发流量、海量终端接入、业务优先级和多租户流量模型，用于验证设备在拥塞、热点汇聚和异常流量冲击下的承载能力。针对星载设备，还需要增加功耗、温度、辐照环境和长时间稳定运行条件下的综合测试，评估软件协议栈与星载硬件平台的适配性。

星间及星地链路模拟设备主要用于在实验室中复现不同轨道高度和运行状态下的链路特征，包括传播时延、时延变化、多普勒频移、误码、丢包、带宽波动、链路中断和切换过程。对于激光链路，还应测试捕获、对准和跟踪过程，以及不同链路距离、指向误差和背景光条件对通信性能的影响；对于微波和毫米波链路，则需要模拟大气衰减、降雨衰减、干扰和频谱复用等因素。Keysight 已经形成面向 GEO、MEO 和 LEO 场景的 NTN 信道建模、卫星链路模拟及地面设备测试方案。Rohde & Schwarz 的 CMX500 等产品则支持 NR-NTN、NB-NTN 和手机直连卫星等多频段、多轨道测试场景。

协议一致性和互操作测试主要验证不同厂商设备对 IPv6、SRv6、路由协议、DTN、QoS、网络切片及管控接口的实现是否符合相关规范。测试系统需要仿真相邻卫星、地面路由器、控制器和业务终端，

构造正常及异常协议交互，检查报文格式、状态机、定时器、路由更新和故障恢复行为。除单设备协议一致性外，还应开展多厂商设备互联测试，重点验证星载设备、信关站、地面承载网和管控平台之间的兼容性，避免因私有扩展、参数差异和接口封闭形成系统割裂。

高动态拓扑和路由验证是卫星互联网承载网区别于普通网络测试的关键。测试平台应能够模拟卫星运动引起的链路周期性建立与断开，批量生成百星、千星规模的虚拟节点和路由邻接关系，并测量拓扑变化条件下的路由计算时间、更新开销、收敛时间、业务中断时间和路径稳定性。对于混合式管控架构，还需要验证地面全局控制器、区域控制器与星上自治节点之间的状态同步和策略一致性。半实物仿真平台可将真实星载路由器、交换机、信关站或 SDN 控制器接入虚拟星座，使设备在可重复、可控制的动态网络环境中运行，从而在卫星发射前发现协议、性能和系统集成问题。

网络安全测试主要面向星间链路窃听与篡改、非法节点接入、路由劫持、恶意控制指令、信关站 DDoS 以及星上软件漏洞等威胁。测试平台应支持攻击流量生成、协议模糊测试、异常报文注入、身份认证绕过和链路干扰模拟，并评估系统的攻击发现时间、策略响应时间、业务性能下降程度和故障恢复能力。安全测试还应覆盖星载软件升级、控制器接口、密码模块和供应链组件，形成从单点漏洞测试到承载网级联风险验证的完整能力。

在轨网络测试与监测系统承担实验室验证向实际运行保障的延伸。系统可通过星上遥测、主动探测报文、业务流量分析和地面站测

量，持续采集链路质量、路由状态、端到端时延、抖动、丢包、吞吐量和故障告警等数据。在不显著占用星间和星地链路资源的前提下，应将主动探测与被动监测相结合，对关键业务实施精细化测量，对普通业务采用抽样和聚合监测。相关数据既可用于网络故障定位和服务质量评价，也可反馈至数字孪生平台，实现模型校准、趋势预测和管控策略优化。

测试验证产业主要可形成以下产品和服务：

表 4-7 测试验证产业产品和服务对比

测试验证环节	主要产品形态	重点测试内容
星座与网络仿真	卫星网络仿真器、轨道与网络联合仿真软件	覆盖、连通性、动态拓扑、路由和资源利用率
数字孪生	星座数字孪生平台、运行数据管理与策略预演系统	状态映射、策略验证、故障复现和容量规划
链路模拟	信道模拟器、链路损伤仪、星间链路模拟设备	时延、多普勒、误码、抖动、丢包和链路中断
设备性能测试	路由器及交换机测试仪、流量发生器	吞吐量、转发时延、缓存、并发规模和拥塞性能
协议与互操作测试	协议仿真器、一致性测试套件	IPv6、SRv6、DTN、路由、切片及管控接口
系统级验证	半实物仿真平台、端到端业务测试系统	星地协同、动态切换、路由收敛和服务连续性

测试验证环节	主要产品形态	重点测试内容
网络安全测试	攻击仿真、模糊测试和安全评估平台	DDoS、路由劫持、非法接入、篡改和级联风险
在轨测试与监测	网络探针、遥测分析和运行监测系统	链路质量、业务性能、故障定位和趋势预测

从产业主体看，国际厂商在高精度信道模拟、射频测试、网络流量生成和空间任务仿真等领域积累较深，逐步形成从器件、终端和基站测试向端到端 NTN 验证延伸的产品体系。国内测试仪表企业也开始面向卫星互联网提供协议仿真、流量生成、网络损伤和海量终端接入测试。例如，信而泰已公开卫星互联网融合通信测试方案，覆盖数通设备测试、BGP-LS 等协议测试、网络损伤模拟和多终端并发接入验证。信而泰卫星互联网测试方案、紫金山实验室等科研机构研制的卫星网络试验平台，则主要承担新型组网架构、动态路由和网络操作系统的科研及工程验证，为专用测试产品的形成提供技术基础。

总体来看，国内卫星互联网测试验证产业正在由通用通信仪表适配向专用化、系统化方向发展，但在超大规模高动态星座仿真、星间激光链路模拟、高精度多节点时间同步、多厂商协议互操作以及在轨网络闭环监测等方面仍需加强。未来应推动测试仪表企业、卫星设备厂商、星座运营商、科研机构和第三方检测认证机构共同建设开放的测试验证体系，形成统一的测试场景、指标体系、数据集和评价方法。通过自主测试仪表、数字孪生平台和半实物试验环境建设，逐步实现

从单机测试向整网验证、从发射前验证向全生命周期保障、从功能符合性测试向性能、安全和可靠性综合评价演进。

4.7 网络运营与行业服务

4.7.1 全球主要星座服务布局与运营模式

卫星互联网星座既是空间通信基础设施，也是承载网产业价值落地的主要运营载体。本节围绕卫星互联网承载网及其协同的地面骨干网络，重点分析用户流量接入后的星上转发、星间组网、星地汇聚和信关站承载，以及与互联网、移动通信网、云平台和行业专网的互联。其中，运营商地面骨干网承担落地流量的后续传输与跨域互联，属于外部协同网络，不纳入卫星互联网承载网自身范围。由于星座规模、星间链路配置、地面站密度和目标市场不同，全球主要卫星互联网系统在空间组网、星地传输、地面网络协同和按需服务编排等方面形成了不同的建设与运营模式。

Starlink：由星地转发向空间光网络承载演进。Starlink 是当前全球规模最大、商业化程度最高的低轨卫星互联网系统。截至 2026 年初，其在轨卫星和用户规模均已达到较大规模，服务范围由固定宽带扩展至航空、海事、企业网络、移动场景和手机直连卫星。从承载网结构看，Starlink 已经形成“用户终端—低轨卫星—星间激光链路—信关站—互联网接入点”的端到端网络。星间激光链路使业务流量能够在空间网络中跨星转发，并根据地面出口可用性和网络拥塞状态选

择落地点，从而降低对用户所在区域附近信关站的绝对依赖。

在网络运行方面，Starlink 通过监测卫星、波束、星间链路、信关站和互联网接入点状态，动态选择星间与星地路径。当局部地面站发生故障、自然灾害或链路拥塞时，业务可通过星间激光链路绕行至其他区域的信关站落地。其公开技术资料显示，激光链路主要用于连接缺少本地星地出口的偏远区域以及绕开网络拥塞；对于时延敏感业务，系统则尽可能选择较短的星地和地面路径。这表明 Starlink 承载网已经由以信关站为中心的星地转发网络，演进为星间光网络与全球地面骨干协同的动态承载体系。

Starlink 采用卫星研制、发射、终端、网络运营和服务销售垂直整合模式，能够根据用户分布和网络负荷协同调整卫星部署、信关站建设和网络软件。其 Direct to Cell 业务进一步将普通移动终端流量引入卫星承载网：接入侧由卫星与地面移动终端直接通信，承载侧则需要完成移动运营商网络互联、用户鉴权、业务汇聚及跨区域传输。随着业务由短信和低速数据向语音及宽带数据扩展，DTC 流量将对星上汇聚、星间骨干和运营商互联提出更高要求。

Eutelsat OneWeb：以星地转发和地面广域网为核心的企业级承载。Eutelsat OneWeb 已经形成由 600 余颗低轨卫星组成的全球网络，重点服务电信运营商、政府、企业、航空和海事用户。与 Starlink 面向个人用户直接运营的模式不同，OneWeb 主要采用容量批发和合作伙伴运营模式，由当地电信运营商、卫星服务商和行业集成商面向最终用户提供连接服务。

从承载网形态看，OneWeb 第一代网络对卫星网络门户、地面站和地面光纤广域网的依赖程度较高。用户流量经低轨卫星转发至可见的卫星网络门户，再通过地面光纤、海底光缆和互联网接入点传输至目标网络。该模式能够充分利用成熟的地面承载网络，但其服务连续性和路径性能受到卫星网络门户分布、星地链路可用性及地面光缆资源的影响。Eutelsat 通过高轨卫星与 OneWeb 低轨网络协同，为用户提供不同覆盖范围、容量和可靠性组合，形成多轨融合运营模式。其后续承载网建设将进一步增强星间光互联、地面门户冗余和多轨资源统一调度能力，降低对单一路径和单一地面设施的依赖。

Amazon Leo: 面向云网融合的星间光网络承载。亚马逊原 Project Kuiper 已于 2025 年更名为 Amazon Leo，并于 2025 年 4 月启动星座规模部署。其初始系统由 3000 余颗低轨卫星组成，卫星之间通过高速光链路连接，并与全球信关站、光纤网络和互联网接入点共同构成端到端承载体系。

Amazon Leo 的特点在于卫星承载网与亚马逊云基础设施协同建设。卫星流量不仅可通过地面接入点进入公共互联网，还可直接衔接云计算区域、数据中心和企业虚拟网络，为企业用户提供从远程终端到云资源的统一连接。其承载网建设重点包括形成稳定的星间光链路拓扑、扩大信关站和互联网接入点覆盖、实现卫星网络与地面云骨干协同选路，并根据企业业务需求动态分配带宽和落地点。Amazon Leo 目前仍处于规模部署和业务导入阶段，其星间组网、全球地面设施和运营平台需要随卫星数量增长逐步形成完整服务能力。

Telesat Lightspeed：面向企业级 SLA 的按需组网。 Telesat Lightspeed 虽然星座规划规模小于 Starlink 和 Amazon Leo，但其承载网设计更突出星上处理、星间光互联和企业级服务保障。按照公开方案，每颗卫星配置多条光学星间链路，形成具有冗余路径的空间网状网络，并通过数字波束形成和星上再生处理，根据机场、港口、偏远社区等区域的业务需求动态配置容量。

在管控方面，Telesat 选择 Aalyria Spacetime 平台进行星座网络编排，通过分析候选星间、星地和地面路径，动态完成天线链路调度、路由选择和频谱资源配置。其运营模式主要面向电信运营商、企业、政府和移动场景，提供可配置容量池、点到点连接、承诺信息速率和服务等级协议，而不是以尽力而为的公众互联网接入为主。该系统代表了一种“较少高能力卫星+星间光网络+按需资源编排”的承载网路线，但截至目前仍处于建设部署阶段，其大规模运行效果有待后续商业服务验证。

中国星网：由规模组网向国家卫星互联网承载体系建设推进。 中国卫星网络集团承担我国卫星互联网的设计、建设和运营任务。随着卫星互联网低轨卫星持续批量发射，我国国家卫星互联网已经由技术试验进入规模组网阶段。公开信息主要集中在卫星发射和系统建设进展，对具体星间链路配置、路由协议和管控平台架构披露较少，因此不宜对其承载网技术方案作过度推断。

从承载网建设需求看，中国星网相关系统需要逐步形成覆盖空间段和地面段的完整体系：空间段应解决大规模卫星节点之间的高速互

联、动态路由和故障绕行；星地段应建设覆盖不同区域的信关站和星地互联中心，完成流量汇聚与卸载；地面段则需与基础电信运营商骨干网、移动通信网、云平台和行业专网对接。在由百星级组网向千星、万星规模扩展过程中，管控模式也需要由以地面集中规划为主，向全局集中控制、分层分域协同和星上局部自治相结合的混合模式演进。近期建设重点是完成组网验证、信关站及地面骨干协同和区域服务能力形成，随后再根据业务分布逐步建立面向全球覆盖和行业服务的按需承载能力。

千帆星座：由百星级组网验证向全球服务落地推进。千帆星座由上海垣信卫星科技有限公司建设运营，是我国进入正式组网阶段的巨型商业低轨卫星星座。截至 2026 年，千帆星座已进入百星级规模组网阶段，并持续开展互联网接入、航空、海事及海外应用验证。公开测试结果显示，千帆星座已实现多颗卫星连续切换和较长时间连续通信，验证了低轨卫星快速移动条件下的波束切换、业务保持和星地协同能力。

现阶段公开资料尚未完整披露千帆星座的星间链路和星上路由架构，其已公布的应用测试更多体现星地接入、多星切换和地面网络互联能力。因此，近期承载网建设重点应包括扩大连续覆盖范围、提高多星切换稳定性、完善国内外信关站布局，以及建立与地面运营商骨干网和云平台的互联。千帆星座已完成巴西当地信关站建设和星地通信调试，并获得当地商业通信服务批准，表明其全球运营正在从单纯卫星覆盖转向“在轨星座+属地信关站+地面网络+运营许可”的

完整落地模式。

随着星座规模进一步扩大，千帆星座需要由区域连续接入向空间骨干承载演进，根据星间链路建设情况逐步形成跨轨道面转发、动态路径选择和多地面出口协同能力。同时，应围绕“一带一路”沿线、航空航线、远洋航线和中资企业海外项目，按区域服务密度部署信关站和互联网接入点，形成按需扩容和属地合作相结合的商业运营模式。

时空道宇：卫星物联网由星座组网进入持牌商用试验。时空道宇建设运营的“吉利未来出行星座（一期）”主要面向低轨卫星物联网。截至 2026 年 8 月，企业公开信息显示其一期星座已经完成组网，在轨卫星共 64 颗，可为智慧交通、海洋渔业、能源水利、交通物流和低空出行等场景提供广域物联网连接。

2026 年 8 月 20 日，工业和信息化部批复浙江时空道宇科技有限公司开展卫星物联网业务商用试验，试验期为两年。商用试验期间，时空道宇可依法试点经营卫星物联网业务，依托已完成一期组网的低轨星座，为数据采集终端、穿戴设备、手持终端以及汽车、船舶和飞机等提供低速数据连接。需要说明的是，该批复针对卫星物联网低速数据业务，并不等同于面向公众宽带接入的通用卫星互联网运营牌照。卫星物联网承载网与宽带卫星互联网存在明显差异。其单次报文和单终端流量较小，但终端数量多、分布范围广、在线周期和业务优先级差异明显，承载体系更关注海量终端接入、短报文汇聚、低功耗传输、业务可靠交付和行业平台互联。时空道宇由卫星研制和星座部署进一步进入持牌运营阶段后，需要完善终端身份管理、接入控制、消息汇

聚、业务分级、服务质量监测、计费结算和开放接口，并根据行业需求建立从卫星接入、地面落地到行业平台的数据传输闭环。其发展表明，我国商业卫星运营主体正在由“完成卫星发射和组网”向“持续提供网络连接和行业服务”转变。

全球主要星座的承载网形态和运营模式可归纳如下。

表 4-8 全球主要星座的承载网形态和运营模式对比

星座或系统	当前发展阶段	主要承载网形态	运营模式	承载网建设重点
Starlink	全球规模运营	星间激光网状网络、全球信关站和互联网接入点协同	垂直整合，兼顾公众与行业直销	激光网状路由、拥塞绕行、DTC 流量汇聚和全球服务优化
Eutelsat OneWeb	全球企业级服务	星地转发、卫星网络门户和地面光纤广域网协同	容量批发和合作伙伴运营	地面门户冗余、多轨协同和后续星间互联增强
Amazon Leo	规模部署和业务导入	星间光链路、信关站、光纤骨干和云基础设施协同	企业服务与云生态协同	完成光网络组网、全球落地和云网星统一调度
Telesat Lightspeed	建设部署	星上再生处理、星间光网络和动态波束编排	面向运营商和企业的	按需组网、容量池、SLA 和多域动态编排

星座或系统	当前发展阶段	主要承载网形态	运营模式	承载网建设重点
			“承运商的 承运商”	
中国星网	规模组网	具体架构公开信息有限，正形成空间段与地面段协同体系	国家统筹建设运营	星间组网、星地互联中心、地面骨干对接和分层管控
千帆星座	百星级组网与服务验证	当前以多星切换、星地接入和地面互联验证为主	市场化、全球化和属地合作	连续覆盖、信关站布局、全球落地及空间骨干能力建设
时空道宇	一期组网完成并进入商用试验	面向海量低速终端的卫星物联网承载	全栈运营与行业合作	海量接入、短报文汇聚、行业平台互联和运营支撑

总体来看，全球卫星互联网承载网正在形成三种主要发展模式：一是以 Starlink 为代表的“星间光网络+全球地面设施+垂直运营”模式；二是以 OneWeb 和 Telesat 为代表的“卫星承载能力+地面运营商和行业合作伙伴”模式；三是以 Amazon Leo 为代表的“卫星网络+云基础设施”融合模式。我国则形成国家卫星互联网、商业宽带星座和卫星物联网星座并行发展的格局，分别面向国家战略与公众通

信、全球商业宽带及行业物联网服务。

未来承载网竞争的关键将由卫星发射数量逐步转向持续组网和业务承载能力。所谓按需组网，是根据用户位置、业务等级和服务时段，动态选择接入卫星、波束、星间路径、信关站、地面出口和云服务节点，并根据故障、拥塞和覆盖变化实时调整承载关系。实现这一目标，需要将星间光网络、星地链路、地面骨干、网络管控平台和运营支撑系统统一起来，使卫星星座由“能够建立通信链路”进一步发展为“能够按需提供端到端网络服务”的新型信息基础设施。

4.7.2 卫星互联网接入与融合运营服务

卫星互联网接入与融合运营服务是将星座覆盖能力转化为可持续网络服务的关键环节。其服务对象既包括偏远地区家庭、企业和公共机构，也包括航空器、船舶、车辆、物联网终端及海外行业用户。与传统卫星通信主要提供固定专线或转发器容量不同，卫星互联网需要面向大量用户持续提供互联网接入、移动通信补充、行业专网连接和跨境通信服务，并建立与之配套的用户管理、服务开通、质量保障、计费结算和运行维护体系。

全球互联网接入是卫星互联网最基础的运营服务。依托低轨星座的广域覆盖能力，卫星互联网能够为海洋、极地、沙漠、山区、海岛及“一带一路”沿线地面网络薄弱区域提供宽带连接，也可作为地面通信网络的补充覆盖和应急备份。但是，卫星能够覆盖某一区域并不意味着已经具备当地商业服务能力。全球接入还需要完成频率与运营

许可、属地信关站和互联网接入点建设、地面骨干网络连接、终端认证、用户服务及数据合规等工作。因此，卫星互联网的全球运营本质上是空间网络覆盖能力与各国地面通信基础设施、监管体系和服务渠道的协同落地。

从服务形态看，全球互联网接入可分为面向个人和小微企业的直接接入、面向电信运营商的容量批发以及面向政府和行业用户的专线服务。直接接入模式通常采用“用户终端+网络订阅+流量套餐”的方式，由卫星运营商直接负责终端、网络 and 客户服务；容量批发模式由卫星运营商提供区域覆盖和网络容量，再由当地电信运营商或互联网服务商完成用户发展、业务开通和属地运维；专线服务则面向跨境企业、海外园区、港口、矿区和能源设施，为用户提供具有带宽、时延、可用性和安全保障的端到端连接。不同模式可以根据区域人口密度、地面网络条件和监管要求组合使用。

卫星运营商、地面运营商和云服务商是融合运营体系中的三类核心主体。卫星运营商负责卫星星座、星间链路、星地链路、信关站和卫星网络管控，向外提供覆盖、带宽和传输能力；地面运营商拥有移动通信网、IP 骨干网、用户体系、号码与身份资源、计费平台和属地服务渠道，负责卫星网络与现有通信业务的融合；云服务商则提供计算、存储、数据处理、内容分发和行业应用平台，使卫星接入流量能够快速进入云端业务系统。

三类主体可以形成多种合作模式。一种是由卫星运营商垂直整合星座、终端、网络和服务，直接面向用户提供互联网接入；一种是由

卫星运营商向地面运营商批发容量，地面运营商将卫星连接作为固定宽带、移动通信或行业专网的补充；另一种是由卫星运营商、地面运营商和云服务商共同提供“连接+网络+云平台+行业应用”综合服务。对于我国卫星互联网而言，充分利用基础电信运营商已有的骨干网、核心网、用户渠道和运维体系，可以减少重复建设，并加快卫星网络服务向公众和行业市场落地。

在与地面互联网衔接方面，卫星接入流量可经星地链路在信关站落地，再通过互联网接入点和运营商骨干网进入公共互联网。承载网需要根据用户位置、业务目的地、信关站负荷和地面网络状态选择适当的流量出口，避免业务绕行引起时延增加。对于具备星间链路的星座，还可先通过空间网络将流量转发至更接近业务目的地或网络条件更优的信关站，再进入地面互联网。运营主体需要进一步建立路由协同、地址管理、流量调度、对等互联和安全防护机制，保障卫星用户与互联网业务之间的稳定连接。

在与移动通信网衔接方面，卫星网络可作为地面蜂窝网络的覆盖延伸，为普通手机、车载终端和物联网设备提供短信、语音和数据服务。卫星运营商与移动运营商需要在用户身份认证、核心网接入、移动性管理、业务路由、漫游结算和服务质量保障等方面协同，使用户能够在地面网络和卫星网络之间按需切换。对于手机直连卫星业务，接入链路虽然直接建立在终端与卫星之间，但后续用户鉴权、业务交换、数据传输和计费仍需依托卫星承载网及移动运营商网络完成。因此，手机直连卫星不仅是接入方式的变化，也会带来星上汇聚、星间

传输和星地出口流量的持续增长。

在与行业专网衔接方面，卫星互联网主要为能源、电力、矿山、交通、应急和重大行业提供广域连接、补充覆盖及容灾备份。行业用户可通过专用信关站、专线接口、虚拟专网或网络切片，将远端卫星终端接入企业数据中心、生产平台和指挥系统。与公共互联网接入相比，行业专网更关注业务隔离、身份可信、传输加密、确定性保障和故障恢复。运营主体需要根据行业用户的业务等级，提供差异化带宽、优先级、路径保护和安全策略，并建立可量化的服务等级协议。

融合运营还需要建立统一的业务编排和运营支撑体系。用户提出覆盖区域、接入规模、带宽、时延、安全和服务时段等需求后，运营平台应能够协同卫星、波束、星间链路、信关站、地面骨干和云资源，形成端到端服务，并持续监测服务质量。当局部链路拥塞、信关站不可用或业务需求发生变化时，系统应能够调整流量出口和承载路径。通过开放网络能力接口，云服务商和行业应用平台还可以按需查询网络状态、申请带宽、调整服务等级和获取质量监测结果。

总体来看，卫星互联网运营正在由单一卫星容量供给转向星地融合的端到端服务。其核心不只是让用户终端“接入卫星”，而是贯通卫星星座、信关站、地面骨干网、移动核心网、云平台和行业专网，形成覆盖业务开通、网络承载、质量保障、计费结算和客户服务的完整运营闭环。未来需要进一步完善跨运营主体协同、国际属地运营、网络服务等级评价和融合计费机制，使卫星覆盖能力真正转化为可规模复制、可持续运营的全球通信服务。

4.7.3 云网星融合与通算服务

云网星融合与通算服务，是指将卫星互联网承载网与地面通信网络、云计算平台、边缘计算节点及星上计算资源进行协同组织，为用户提供连接、计算、存储、数据处理和智能应用一体化服务。其产业价值不再局限于出售卫星链路和网络流量，而是通过承载网络贯通“天基节点—信关站—地面骨干网—边缘节点—云平台”，推动卫星互联网服务由单一连接向“连接+算力+数据+平台”综合服务延伸。

在云网星融合服务中，卫星互联网承载网主要承担空间网络与地面云基础设施之间的数据汇聚和业务调度。卫星终端、在轨载荷及行业专网产生的数据，可经星地链路和星间骨干链路汇聚至信关站，再通过运营商骨干网、云专线或云间互联网络接入云平台，实现数据存储、业务处理和应用分发。面向远洋、航空、能源、应急和偏远地区用户，可进一步形成卫星接入云、星地专线、跨域组网、多云互联、异地容灾和托管运维等服务，使用户能够按照带宽、时长、流量和服务等级按需获取卫星连接及云资源。

云化地面站是当前云网星融合较为成熟的服务形态。传统卫星运营主体需要自建地面站、数据中心和任务处理系统，而云化地面站将天线资源、卫星测控、数据接收、网络传输和云端处理封装为可调用服务。以 AWS Ground Station 为例，用户可以按需使用地面站资源，将卫星数据直接送入云端虚拟网络，并调用存储、流式处理和机器学习等服务开展后续处理。这表明卫星基础设施正在由项目制建设向资

源池化、平台化和按需付费模式转变。

“通算服务”进一步强调通信资源与计算资源之间的协同。承载网不仅需要将数据送达指定节点，还需要结合链路状态、算力位置、任务时限和业务优先级，决定数据在哪里传输、在哪里处理以及处理结果如何返回。现阶段主要形成三个层次：一是以地面云计算为主，卫星承担数据采集和传输，计算任务集中在地面数据中心完成；二是星上轻量处理与地面边缘、中心云协同，在轨完成数据筛选、压缩、特征提取和初步推理，仅将有效数据或处理结果传回地面；三是面向多颗计算卫星开展任务分解、算力共享和星间协同处理，形成空间分布式计算服务。三种模式并非相互替代，而是根据链路条件、任务实时性、数据规模及星上资源进行组合。

星上计算能够缓解原始数据集中下传带来的承载压力，尤其适用于遥感影像筛选、灾害目标识别、海洋环境监测、空间科学观测和在轨设备状态诊断等业务。通过在轨完成数据预处理和智能推理，承载网传输的内容可以由大规模原始数据转变为特征信息、告警信息和任务结果，从而减少星地链路占用并缩短业务响应时间。与此同时，星间链路可将任务转发至具有空闲算力的卫星节点，承载网则需要提供计算感知路由、任务流量调度、结果可靠回传和差异化服务质量保障。国内太空计算基础设施已经进入组网验证阶段。2025 年 5 月，之江实验室“三体计算星座”与国星宇航“星算”计划首发的 12 颗计算卫星入轨；截至 2026 年 2 月，该星座已实现星间组网突破，并完成多项人工智能模型和应用的在轨部署验证，初步形成组网、计算、模

型部署和科学载荷验证能力。这类探索验证了“计算上天、星间互联、天地协同”的可行性，也为形成在轨数据处理、模型调用和算力调度服务奠定了基础。但从产业成熟度看，当前太空计算仍以技术验证和示范应用为主，尚需在资源规模、服务稳定性、开放接口和商业模式等方面持续完善。

从产业分工看，卫星运营商主要提供空间链路、在轨节点和星座资源，地面通信运营商负责信关站接入、骨干承载、专网互联和服务保障，云服务商提供计算、存储、人工智能和开发平台，行业服务商则结合遥感、交通、能源、应急等场景形成应用产品。各类主体可通过统一服务门户和开放接口，共同提供卫星连接、云资源和计算任务的一站式订购、开通、监控与计费，并逐步形成按流量、连接时长、算力使用量、处理数据量及任务优先级计费的组合商业模式。

云网星融合与通算服务的发展仍面临星地资源模型不统一、跨运营主体协同困难、星上算力和能源受限、链路间歇可用以及数据安全边界复杂等问题。相关服务评价也不能只关注网络带宽，还应综合考虑任务完成时延、数据处理时效、服务可用性、计算能效、结果回传可靠性和单位任务成本。总体来看，云网星融合将推动卫星互联网承载网由提供基础连接向提供综合数字能力延伸，通算服务则有望成为承载网络连接能力、空间数据价值和智能应用需求的重要结合点。

4.7.4 重点行业与战略保障服务

重点行业与战略保障服务是卫星互联网产业价值落地的重要方向。与面向公众的通用互联网接入不同，此类服务更加关注广域覆盖、业务连续性、网络可靠性、安全隔离和应急保障能力，需要针对不同行业的运行环境与业务等级，形成“卫星连接、行业终端、承载专网、业务平台和运营保障”一体化解决方案。卫星运营商、地面通信运营商、云服务商和行业系统集成商通过协同运营，可将卫星互联网承载能力转化为面向具体行业的标准化产品和专业化服务。

在航空与海事通信领域，航空航线和远洋航线具有覆盖范围广、跨区域运行、地面网络难以连续覆盖等特点，是卫星互联网规模化应用的重要市场。航空互联网可面向客舱宽带、机组通信、航班运行数据回传和机务保障等业务提供服务，海事通信则可支撑船舶宽带接入、航行安全、船岸协同、远程运维和海洋作业管理。承载网需要根据飞机、船舶的移动轨迹，在不同卫星、波束、信关站及地面网络之间完成连续转发，并对运行控制、安全通信和公众上网等不同业务实施带宽隔离与服务等级保障。相应的运营模式可由单一卫星带宽租赁，逐步转向终端、连接、流量套餐、全球漫游和运维保障相结合的综合服务。

在应急通信领域，卫星互联网能够在地震、洪涝、山火和极端天气导致地面通信设施受损时，为灾区快速建立对外通信通道。其服务对象既包括应急管理、消防救援、医疗救护等专业力量，也包括受灾

区域内需要基本通信保障的社会公众。相关服务可依托便携式终端、车载站、无人机中继和手机直连卫星等方式快速开通，实现语音、短消息、位置上报、现场图像及救援指挥数据的传输。承载网需要提供业务优先级识别、资源预留、应急扩容、拥塞控制和多路径保护能力，保障指挥调度等关键业务优先传送。产业上可形成常态化资源预置、应急保障订阅、重大活动保障和按需快速开通等服务模式，使卫星通信由灾后临时补充转变为国家应急通信体系的常备组成部分。

在能源、电力和矿山专网领域，大量生产设施分布于海上平台、荒漠、山区和边远矿区，地面通信网络建设及维护成本较高。卫星互联网可为油气管线、风电场、光伏电站、输电线路、矿山设备和无人作业系统提供广域连接，支撑生产数据采集、设备状态监测、远程巡检、故障告警和生产调度。由于工业控制和生产管理数据具有较高的连续性与安全性要求，相关服务应以行业专网为主要形态，通过专用接入、逻辑隔离、加密传输和差异化服务质量保障，实现卫星网络与企业数据中心、工业互联网平台及生产控制系统的安全衔接。运营主体可进一步提供终端管理、链路监测、故障处置和网络安全托管等服务，降低行业用户自行建设和维护卫星通信系统的门槛。

在车联网与低空经济领域，卫星互联网能够弥补公路、山区、荒漠和低空航路中的地面网络覆盖缺口。面向智能网联汽车，服务可由紧急呼叫、位置上报和短消息逐步扩展至车辆状态回传、远程诊断、地图更新和辅助信息服务；面向无人机、电动垂直起降航空器等低空飞行器，可提供航迹监视、运行状态回传、任务数据传输和超视距通

信。随着终端数量增加以及车辆、飞行器频繁跨区域移动，承载网需要支持跨波束、跨卫星和星地网络之间的连续服务，并对安全控制类数据与普通业务数据实施分级保障。对于高实时性飞行控制和自动驾驶控制，卫星网络更适合作为地面网络和本地自主控制的补充与备份，不宜替代必要的本地闭环控制系统。

在国防及重大行业专网领域，卫星互联网承载网是提升跨区域通信保障、网络韧性和重要信息基础设施安全水平的重要支撑。相关服务面向国防、公共安全、交通、金融、水利等重大行业，对网络自主可控、安全可信、抗干扰和持续运行能力提出更高要求。承载网络应支持专用资源配置、业务强隔离、可信身份认证、端到端加密、异常行为监测以及故障条件下的快速重构，并建立覆盖设备、链路、平台和运营过程的安全保障体系。服务模式通常以专网建设、专用能力租赁和长期运营保障为主，由具备相应资质的运营主体和设备厂商提供端到端解决方案，同时通过国产核心器件、星载网络设备和管控平台保障关键能力自主可控。

总体来看，重点行业服务正在推动卫星互联网由通用连接能力向行业化、专业化和保障型服务延伸。其竞争重点不仅在于覆盖范围和传输速率，更在于能否围绕行业用户形成可量化的服务等级、稳定的终端与网络供给、安全可信的运营体系以及持续的技术支持能力。未来可针对不同领域形成标准化行业服务包，将卫星终端、网络连接、云平台、行业应用、安全防护和运维保障统一交付，并以网络可用率、业务连续性、开通时效、故障恢复时间和安全保障等级等指标进行服

务评价，推动卫星互联网承载能力转化为可复制、可运营和可持续发展的行业服务。

五、卫星互联网承载网标准化进展

卫星互联网承载网作为未来通信网络体系的关键构成，其标准化工作不仅是技术发展的内在需求，更是国家战略布局的重要体现。本章将详细阐述卫星互联网承载网在国内外主要标准化组织中的进展情况。

5.1 3GPP 标准化进展

3GPP 在非地面网络（Non Terrestrial Network, NTN）领域的标准化工作持续推进，从 Release 17 奠定技术基础，到 Release 18 实现能力升级，再到 Release 19 迈向智能化融合，逐步构建起覆盖空天地的泛在通信体系，并为 6G 时代 NTN 的演进指明了方向。

Release 17 是 NTN 标准化的关键一步，正式将 NTN 纳入 5G 新无线（New Radio, NR）标准体系，顺应全球通信网络向空天领域拓展的趋势。该版本于 2022 年完成 ASN.1 数据结构冻结，支持基于透明卫星架构的 GEO、LEO 和 NGSO 卫星接入，卫星仅作为无线信号的透明转发节点，借助地面 CU/DU 和 Core 网关实现空中中继。在 NB-IoT 和 eMTC-NTN 方面，相关研究定义了物联网设备在卫星链路下的延迟、编码与功耗优化机制，使 NB-IoT/eMTC 能在空中平台稳定连接。总体而言，Release 17 构建了 NTN 的完整技术基础，为其在远程场景的实际应用开辟了道路。

Release 18 致力于优化 NTN 多方面能力以满足丰富应用场景需求。在空地链路与功耗优化上，引入基于时延的移动管理策略、优化邻小区测量触发方式等增强机制，并支持 NB-IoT 和 eMTC 的星历信令，引入裸 ACK 模式减少吞吐量下降。频段扩展上，将 NTN 频谱覆盖延伸至 Ka-band FR2 高频段，实现该频段 NR-NTN 标准化，还提出 L/S 结合频段用于相关场景。定位增强方面，将 NR 定位能力引入 NTN，提升地空协同定位能力。在标准落地与产业协同上，行业组织发布白皮书指导商业化应用，推进相关兼容测试和运营商部署。

Release 19 标志着 NTN 标准体系向智能化、空地融合方向重大转变，核心关注“再生型卫星载荷”（Regenerative Payload, RP）。该版本明确采用 RP 架构，将完整 gNB 部署到卫星上，使卫星具备多种功能，提升 NTN 性能和灵活性。引入存储与转发服务用于 IoT 设备，支持星间链路功能，增强卫星网络自主性和抗毁性。在链路及设备性能指标上，明确多项增强需求，使 NTN 成为具备广域覆盖、智能化能力的 5G 网络分布单元。

3GPP 在 Release 19 后启动 Release 20 工作，标志 NTN 向 6G 演进，涵盖多个前沿议题。未来 Release 21、22 将继续推进再生型卫星载荷与边缘协同功能发展，重点包括空地端融合治理、自主传输控制等，星间链路将扩展应用，为 6G NTN 创造更强大基础设施能力，推动卫星互联网承载网向更高效、智能、融合方向发展。

5.2 IETF 标准化进展

IETF 与 3GPP 不同，其任务聚焦于传输层和网络层协议，致力于使现有 Internet 协议在高时延、链路动态变化的卫星网络中维持性能与可靠性，主要进展集中在传输协议卫星适配（以 TCP 为主、扩展至 QUIC/SCTP 等）、网络层的星座动态路由以及整体协议栈增强工作三个方向。

在传输层协议适配方面，这对提升卫星链路性能、保障数据高效可靠传输至关重要。1999 年发布的 RFC 2488 是 TCP 协议针对卫星链路性能增强的早期重要成果，针对 GEO 卫星环境下信号 RTT 高的特点，提出设置大拥塞窗口、引入 Fast Retransmit/Recovery 机制等优化建议，为后续传输层协议优化奠定基础。

在卫星网络传输优化方面，Jones 等人提交的个人草案《Enhancing Transport Protocols over Satellite Networks》(draft-jones-tsvwg-transport-for-satellite-02) 讨论了卫星路径特性对可靠传输协议性能的影响及相关优化考虑。其内容可用于回顾相关技术问题与研究思路，不作为已形成标准共识或正在推进的标准项目列示。

draft-smith-tsvwg-quic-satellite-performance 针对 QUIC 在 GEO 卫星链路的问题，提出专用性能回归测试方法，通过具体量化指标评估性能并针对性优化。这些工作旨在深度优化核心传输机制，以及为 QUIC 提供可靠高效的卫星链路导入路径。

在卫星网络路由架构研究方面，RFC 9717《卫星网络路由架构》

探讨了利用现有路由协议与机制，并结合可预测的链路连接变化信息，构建可扩展卫星网络的方案。该文档通过独立提交渠道发布，属于信息性 RFC，反映作者的架构观点，可作为卫星承载网架构设计的技术参考。

协议层次的通用增强建议上，IETF 对 IPv6、DNS、TLS 等做了补充标准化调查。IPv6 方面，研究头压缩与可变头方案以缓解带宽开销、适配低吞吐场景；DNS 方面，优化查询以减少延迟，支持本地缓存与分层加速；TLS/QUIC 方面，通过 0-RTT 等技术缩短加密启动握手延迟，将前向纠错 / 多流机制与 QUIC 重传结合改善链路稳定性。此外，IETF MASQUE 工作组研究 QUIC 代理模型，通过显式代理设计避开加密封装限制，使 QUIC 与卫星链路分段器协同发挥作用。这些研究从多维度解决卫星通信技术难题，为卫星通信与地面网络高效融合提供支撑。

5.3 ITU 标准化进展

国际电信联盟（International Telecommunication Union，ITU）在卫星互联网承载网标准化领域担任系统级统筹角色，协调频谱监管、无线接入规范、网络互联与管理控制，其标准化体系主要由 ITU-R 和 ITU-T 合作推进，确保 NTN 在国际移动通信体系中具备可监管、可互通与可操作性。

ITU-R 通过世界无线电通信大会主导全球频谱资源分配，如将 Ka 波段用于卫星与移动地球站协调使用，监管卫星轨道与频谱注册流程，

接受成员国频谱使用申请以保障国际协同免干扰运行。作为 IMT-2020（5G）规范一部分，NTN 自 M.2514 报告起被 WP 4B 工作组认可为重要无线接口方向；ITU-R M.2160-0 提出了 IMT-2030 的总体框架与发展目标，明确沉浸式通信、超高可靠低时延通信、海量通信、泛在连接、人工智能与通信、通信与感知融合六类使用场景，并描述了支撑这些场景的十五项能力。使用场景体现业务应用方向，能力则从峰值数据速率、用户体验数据速率、时延、可靠性、覆盖等维度描述系统特征，两者共同构成 IMT-2030 的框架。该建议书主要面向 IMT-2030 地面组成部分，同时考虑与其他网络的互通，可为星地融合需求分析提供参考。2025 年 WP 5D 推进 IMT-2030 技术性能需求文档，设定 NTN 相关目标，后续会议将制定提交格式等内容。在卫星地球站与地面移动通信系统的频谱共存方面，ITU-R M.2161-0 针对 24.65—25.25 GHz、27—27.5 GHz、42.5—43.5 GHz 及 47.2—48.2 GHz 等指定频段，提供减轻固定卫星业务地球站对 IMT 台站带内干扰的指导。

ITU-T Study Group 15（SG15）定义承载层传输与网间网关接口规范，相关方案用于地面中心与卫星地面站高可靠链路桥接，Recommendation H.248 支持卫星网关控制与信令交互。网络智能与 OAM 协调上，Y 系列文档引入 AI-native 网络评估与 OAM 架构，适用于 NTN 场景，助力实现空地链路切片等功能。安全、QoS 与统一网管方面，Recommendation X.1814 适用于 NTN 保障通信安全，SG15 与 SG13 合作构建一体化地空网络管理体系，支持端到端服务可控及

SLA 合规运行。

ITU-R 与 ITU-T 强调与其他标准化组织协同,M.2160-0 明确 ETSI、3GPP 等组织应联合推进 NTN 与其他无线接入技术的互通机制。ITU-T 焦点小组提供快速应对机制,便于 NTN 向边缘智能等领域拓展。ITU-R WP5D 正协调 WRC-27 的 NTN 频谱议程,为相关频段商用奠定基础,预期 NTN 的 ESIM 使用规范将在 WRC-27 中更新,推动商用注册模式完善。

5.4 CCSA 标准化进展

在国内,中国通信标准化协会(China Communications Standards Association,CCSA)在卫星互联网承载网标准化工作中发挥着核心引领作用。自 2019 年成立航天通信技术工作委员会以来,CCSA 围绕星地一体化开展了一系列深入研究与标准制定工作,积极推动卫星互联网承载网与地面通信网络的融合发展。

在星地融合通信标准方面,CCSA 紧密跟踪国际 3GPP 等组织的研究成果,结合我国国情与产业需求,开展了诸多针对性立项。2023 年 4 月,CCSA TC5 WG9、WG10 和 WG12 工作组全面推进基于 3GPP NTN 星地融合通信标准的立项工作。其中,WG12 工作组通过了《5G 非地网络的核心网技术要求(第一阶段)》行业标准立项,此为国内首个基于 3GPP R17 的非地面网络核心网标准立项。该项目聚焦支持 NTN 的核心网关键技术与规定,致力于为卫星核心网与地面核心网的互联互通筑牢技术根基,对后续构建统一、高效的星地融合核

心网体系意义重大。

基于 5G 的卫星互联网标准化工作同样取得重要进展。2023 年，航天通信技术工作委员会航天通信系统工作组（TC12WG1）第 7 次会议讨论通过了“基于 5G 的卫星互联网第 1 部分：总体要求”行业标准立项申请。该标准由中国卫星网络集团总体牵头，联合中国电信、中国移动、中国卫通、中国联通、中国信息通信研究院等十余家单位共同推进。其预期成果是以地面移动通信网络技术标准、3GPP 的 R17-NTN 技术标准等为基线，形成涵盖核心网、承载网、接入网以及操作维护系统等在内的卫星互联网总体技术规范。该标准的制定将有力推动移动终端直连卫星、物联接入等重要场景的规模应用，切实指导我国卫星互联网的建设与运营实践。

2025 年以来，CCSA 相关标准化工作进一步由卫星接入和核心网互通向星间承载链路延伸。2025 年，在 CCSA 航天通信技术工作委员会卫星中继与计算工作组（TC12 WG4）会议上，《星间激光通信系统链路层协议》通信行业标准获批立项。该项目面向星间激光通信系统缺少统一链路层协议的问题，推动星间链路接口与通信规程的规范化，为不同设备和不同卫星系统之间的互联互通提供标准基础。这表明我国卫星互联网标准化工作已开始由总体架构、接入网和核心网逐步深入星间高速承载环节。

2026 年，CCSA 进一步形成了《星地融合网络协同无线组网技术研究》（SR 660—2026）和《卫星互联网确定性网络控制面技术研究》（SR 655—2026）等研究成果，研究重点延伸至星地网络协同组网以

及卫星互联网确定性承载与控制等方面。相关研究面向卫星互联网拓扑高度动态、跨域资源协同复杂以及不同业务保障要求差异明显等问题，为后续开展承载网架构、控制接口、业务保障和测试验证等标准研制提供了技术基础。与此同时，TC12 WG3 围绕星地协同组网持续开展前沿技术研讨，推动相关技术与标准需求进一步衔接。

总体来看，CCSA 已初步形成覆盖卫星互联网总体要求、非地面网络接入、核心网互通、星间激光链路以及协同组网与承载控制的标准化布局。其标准化重点正由基于 3GPP R17 的基本接入和网络互通，逐步扩展至星间高速传输、星地协同组网、确定性业务保障和规模化网络管控，为我国卫星互联网承载网建设及其与地面通信网络的融合提供标准支撑。

5.5 其他组织与行业标准进展

除 ITU、3GPP、IETF 和 CCSDS 等国际标准组织外，我国也在通过全国专业标准化技术委员会、通信行业标准组织和相关科技社团推进卫星互联网标准化工作。其中，与卫星互联网空间段及承载网关系最为密切的组织之一是全国宇航技术及其应用标准化技术委员会（SAC/TC425）。

SAC/TC425 是在国家标准化管理委员会指导下，负责宇航技术及其应用领域国家标准制修订工作的专业标准化技术组织，秘书处由中国航天标准化研究所承担，对口国际标准化组织 ISO/TC 20/SC 13

“空间数据与信息传输系统”和 ISO/TC 20/SC 14 “空间系统及其运行”。其标准化范围涵盖航天器总体、空间环境、宇航电子、空间数据与信息传输、空间碎片以及航天器研制与运行等领域，为我国航天系统的设计、研制、试验、运行和应用建立了较为完整的国家标准基础。

在 SAC/TC425 下设机构中，空间数据与信息传输分技术委员会（SAC/TC425/SC3）与卫星互联网承载网的关系最为直接。该分技术委员会围绕航天器内部、航天器之间以及航天器与地面系统之间的数据传输，形成了覆盖空间数据链路、空间包、文件传输、时延容忍传输、时间同步和航天器内部总线等方面的国家标准。代表性标准及其与卫星互联网承载网的关系如表 5-1 所示。

表 5-1 SAC/TC425 归口的卫星承载相关代表性标准

标准方向	代表性标准	与卫星互联网承载网的关系
空间数据链路	GB/T 39345—2020 《空间数据与信息传输系统 高级在轨系统空间数据链路协议》、GB/T 39350—2020 《遥控空间数据链路协议》、GB/T 39351—2020 《遥测空间数据链路协议》	规范空间链路帧格式、链路传输及遥测遥控数据交互，可为空间承载链路的数据封装和可靠传输提供基础
空间分组与统一链路	GB/T 42039—2022 《空间数据与信息传输系统 空间包协议》、GB/T	支持不同业务数据在空间链路上的统一封装与传递，为

标准方向	代表性标准	与卫星互联网承载网的关系
	42040—2022 《空间数据与信息传输系统 统一空间数据链路协议》	星间、星地链路的协议适配 提供参考
文件与时延容忍传输	GB/T 42038—2022 《空间数据与信息传输系统 文件传输协议》、GB/T 42649—2023 《利克莱德传输协议》、GB/T 42644—2023 《束协议》	面向长时延、间歇连接和高误码链路提供可靠传输能力，可用于星地文件分发、星上软件更新和延迟容忍业务
时间同步与确定性传输	GB/T 39355—2020 《空间数据与信息传输系统 时间码格式》、GB/T 39340—2020 《宇航电子时间确定性网络协议》	为星上设备时间同步、确定性传输和关键业务时延保障提供基础
航天器内部网络	GB/T 43671—2024 《空间数据与信息传输系统 航天器 CAN 总线通信协议》等	规范星上载荷、平台和处理设备之间的通信，可支撑星载路由器、交换机和计算平台的内部互联
空间光通信	GB/T 43372—2023 《空间数据与信息传输系统 深空光通信物理层》、GB/T 43423—2023 《深空光通信编码与同步》	对空间激光通信物理层、编码和同步机制进行规范，可为高速星间及星地激光承载链路提供技术参考

例如，GB/T 42038—2022 适用于航天器到地面、地面到航天器以

及航天器之间的文件传输，能够支持航天器文件存储器的上传、下载和控制；GB/T 39340—2020 则规定了宇航电子时间确定性网络协议，为星上关键业务的确定性通信提供了标准基础。这些标准主要继承和转化 CCSDS、ISO 等空间数据系统标准成果，已初步覆盖空间数据传输的物理层、数据链路层、分组封装、可靠传输和应用支持等环节。

国家标准信息公共服务平台：GB/T 42038—2022、GB/T 39340—2020。

除 SAC/TC425 外，中国通信标准化协会（CCSA）主要从公众通信网络和星地融合角度推进相关标准研制。《基于 5G 的卫星互联网第 1 部分：总体要求》等项目以 3GPP NTN 标准为基础，研究接入网、承载网、核心网、业务模型和操作维护系统的总体要求；《天地一体网络业务连续性研究》《天地一体网络流量调度研究》等课题则进一步涉及星地融合环境下的流量调度和服务质量保障。总体而言，SAC/TC425 更侧重空间段、航天器及空间数据传输，CCSA 更侧重卫星网络与地面移动通信网、IP 承载网和运营支撑系统的融合，两者具有较强的互补关系。

中国通信学会、中国无线电协会等组织也在开展相关团体标准研究。中国通信学会已成立空天地融合网络与应用标准工作组，并推进《低轨卫星互联网的确定性服务需求和总体架构》等团体标准立项；中国无线电协会则围绕天通一号卫星移动终端的通信性能和测试方法开展标准化工作。这些标准主要面向确定性服务、终端设备和行业应用，可作为国家标准和通信行业标准的补充。

5.6 标准协同关系、空白与推进建议

卫星互联网承载网横跨航天系统与信息通信网络，其标准体系涉及频率轨道、卫星接入、空间数据链路、IP 组网、网络管控、安全保障及测试验证等多个领域。目前，ITU、3GPP、IETF、CCSDS、ISO 以及国内 SAC/TC425、CCSA 等组织已分别开展相关标准化工作，但各组织的标准化对象、技术边界和应用场景存在差异，尚未形成完整统一的卫星互联网承载网标准体系。

（1）现有标准的协同关系

从技术分工看，ITU 主要负责卫星业务频率划分、轨道资源协调、无线电接口和国际监管规则，为卫星互联网建设提供频轨资源和无线电规则基础；3GPP 主要将卫星网络作为地面移动通信网络的非地面接入方式，围绕 NR-NTN、IoT-NTN、终端接入、移动性管理和核心网增强制定标准；IETF 主要负责 IPv6、路由、传输、网络管理和安全等互联网协议，其中时间变化路由（Time-Variant Routing，TVR）等工作开始考虑卫星拓扑可预测变化问题。

CCSDS 及 ISO/TC 20/SC 13 主要面向航天器通信，形成空间数据链路、空间包、文件传输、时延容忍网络、时间码和光通信等标准；国内 SAC/TC425 及其空间数据与信息传输分技术委员会主要承担相关国际标准的国内转化，并结合我国航天工程形成空间数据传输、星载网络和航天器接口等国家标准。CCSA 则主要面向公众通信网络和星地融合应用，研究卫星接入网、承载网、核心网及运营管理系统的

总体技术要求。

上述标准之间总体形成了“ITU 频率与轨道规则—3GPP 卫星接入与核心网—IETF IP 承载与路由—CCSDS/ISO 空间数据传输—SAC/TC425 国内航天标准—CCSA 国内通信行业标准”的分工关系。

表 5-2 卫星互联网承载网相关标准组织协同关系

标准组织	主要标准化范围	与承载网的关系	当前局限
ITU	频率划分、轨道协调、卫星业务和无线电规则	提供频轨资源及星地无线传输基础	较少涉及星座内部 IP 组网与网络管控
3GPP	NR-NTN、IoT-NTN、终端接入、核心网和移动性管理	解决卫星接入地面移动通信网络的问题	重点仍在接入和核心网，对星间承载关注不足
IETF	IPv6、路由、传输、SDN 和网络管理	提供承载网 IP 化和互联网互联协议	现有协议对高动态、大时延和间歇链路的适应性仍需增强
CCSDS/ISO	空间数据链路、空间包、CFDP、DTN 和光通信	提供星间、星地数据传输及存储转发机制	更侧重任务数据传输，与公众互联网业务衔接不足
SAC/TC425	空间数据传输、星载总线、时间同步及航天工程应用	推动空间通信标准国内转化和工程应用	面向大规模商业星座的承载网标准仍不完整

标准组织	主要标准化范围	与承载网的关系	当前局限
CCSA	5G 卫星互联网、承载网、核心网和运营管理	推动卫星网络与地面通信网融合	与航天标准之间的接口映射和联合验证仍需加强

（2）现阶段主要标准空白

一是缺少卫星互联网承载网总体架构标准。现有标准分别从卫星接入、空间数据传输或地面 IP 网络出发，对承载网的功能边界、网络分层、节点类型、接口关系和能力要求尚未形成统一定义，特别是星间承载、星地承载和地面骨干承载之间的协同关系需要进一步明确。

二是缺少面向多轨道、多星座的统一组网标准。低轨、中高轨卫星以及地面网络在拓扑变化、链路时延、带宽和可用性方面存在较大差异，现有标准尚未系统解决跨轨道寻址、动态路由、域间互联、协议转换和跨运营商协同问题。IETF 的 TVR 等工作已开始研究可预测拓扑变化，但相关协议和数据模型仍处于持续完善阶段。IETF TVR 工作。

三是星载承载设备及其接口标准不足。目前已经形成星载总线和空间数据链路标准，但面向星载路由器、星载交换机、星地融合网关和激光星间链路终端，仍缺少统一的数据平面接口、转发表模型、设备能力描述和多厂商互操作要求。

四是承载网控制与管理标准不完善。针对高动态星座的拓扑预测、路由控制、流量工程、网络切片、故障管理、智能运维和控制器南北

向接口尚未形成统一规范，集中式、分布式和混合式架构之间也缺少一致的控制信息模型和跨域协同机制。

五是服务质量与安全标准有待加强。现有标准尚未建立卫星接入业务需求向承载网带宽、时延、抖动、丢包率、可用性和业务优先级的统一映射机制，也缺少适用于航空、海事、应急和重大行业专网的服务等级协议及测量方法。在安全方面，星间身份认证、路由安全、星上软件完整性、控制平面防护和在轨密钥更新等仍需形成专门标准。

六是缺少完整的测试验证标准。卫星互联网承载网需要覆盖设备测试、协议一致性测试、互操作测试、动态拓扑仿真、半实物验证和在轨测试，但目前不同研制单位的测试指标、场景和工具尚不统一，难以支撑多厂商设备互联和系统级性能评价。

（3）标准化推进建议

首先，应加强 SAC/TC425 与 CCSA 之间的跨领域协同。由 SAC/TC425 重点推进空间段、星载设备、空间链路和航天环境适应性标准，由 CCSA 重点推进 IP 承载、星地融合、网络管控和运营服务标准，并建立与 ITU、3GPP、IETF 和 CCSDS 标准的对应关系，减少航天标准与通信标准之间的重复和接口断点。

其次，可按照“总体架构—设备接口—协议机制—管控安全—测试验证”的层次构建承载网标准体系。近期优先制定术语定义、参考架构、网络节点、接口分类和总体技术要求，统一承载网边界；中期重点推进星载路由交换、动态路由、跨域互联、流量工程、网络切片、服务等级和安全可信标准；远期面向多轨道、多星座和跨运营商互联，

形成开放的网络能力接口及全球互操作规范。

再次，应建立“标准制定—仿真验证—设备研制—试验星座—在轨验证”的闭环机制。依托星座数字孪生、网络仿真平台和半实物试验环境，对路由收敛、切换时延、控制开销、服务质量和抗毁能力等指标进行统一测试，并通过试验星和示范网络验证标准的可实施性。

最后，应积极推动国内技术方案进入国际标准体系。围绕高动态路由、星载路由交换、确定性承载、星地协同管控、激光星间组网和安全可信等具有自主技术积累的方向，推动国内标准与 3GPP NTN、IETF TVR、CCSDS 空间数据系统及 ISO 宇航标准协同发展，逐步提升我国在卫星互联网国际标准制定中的参与度和影响力。

总体而言，卫星互联网承载网标准化的关键不在于简单叠加现有航天标准和通信标准，而在于打通空间链路、IP 承载和业务服务之间的接口，形成跨组织、跨层次、可验证的标准体系，为多厂商设备互联、跨星座组网和规模化运营提供统一依据。

六、卫星互联网承载网关键挑战

卫星互联网作为实现全球无缝覆盖的关键基础设施，其承载网在运行过程中面临着诸多特殊问题。本章将重点剖析轨道/频谱资源紧张、空间环境复杂、安全风险级联效应以及星地融合难题对承载网造成的影响，并针对这些问题提出相应的应对策略。

6.1 轨道与频谱资源约束下的规模化挑战

轨道和频谱资源是卫星互联网运行的核心基础，其稀缺性和紧张状况直接制约承载网容量，形成显著瓶颈。

从轨道资源看，地球轨道资源有限，低地球轨道因传输延迟低、链路损耗小成为发展热点，但可利用空间有限。随着各国加大投入，大量卫星进入低轨导致轨道日益拥挤，增加卫星间干扰风险，为避免干扰需保持距离和角度，限制了可部署卫星数量，而承载网容量与卫星数量相关，有限数量难以满足用户需求，造成容量不足。

频谱资源同样紧张。卫星通信依赖特定频段，低频段绕射能力强、损耗小但带宽窄，高频段带宽丰富却受天气影响大、损耗高。目前低频段已被大量占用，高频段开发面临技术难题。频谱由国际电信联盟统一管理，各国竞争激烈，分配难以满足卫星互联网快速发展需求，直接限制承载网数据传输速率和容量，使其无法高效处理海量用户数据。

应对策略方面，轨道资源上，优化卫星星座设计，如采用多层架构合理搭配不同轨道高度卫星，实现无缝覆盖并减少干扰；加强国际合作协调，建立公平的轨道分配机制，避免资源过度争夺和浪费。频谱资源上，加大高频段研发投入，突破技术瓶颈，提高利用效率；推广动态频谱共享技术，感知空穴供非授权用户临时使用；通过频谱聚合技术将分散资源聚合，形成更宽带宽，提升承载网容量。

6.2 复杂空间环境下的链路可靠性挑战

空间环境的复杂性给卫星互联网承载网的链路可靠性带来极大挑战，各种空间环境因素相互作用，导致链路信号传输不稳定、中断概率增加，严重影响承载网正常运行。

电离层扰动会通过色散和闪烁等机制影响穿越电离层的卫星链路。在常用卫星导航与通信频段，一阶电离层群时延与沿传播路径的总电子含量成正比、与载波频率的平方成反比，因此在其他条件相同时，较低频率链路的色散时延更为显著，不能概括为“频率越高，电离层影响越大”。电离层闪烁则表现为信号幅度和相位的快速波动，其影响需结合工作频率、地理位置、地方时、空间天气及接收机跟踪能力评估，与色散时延分别建模。Ku、Ka 及更高微波频段星地链路中的雨衰主要属于对流层传播效应，应依据降雨条件、频率、极化和链路仰角进行分析，不应归因于电离层扰动。太阳射电干扰则与太阳辐射在接收频段内的强度及天线指向有关，例如太阳进入地面接收天线波束时可能增加接收噪声。上述机制应分别评估，并据此确定链路补

偿与业务保护措施。

为提高承载网链路可靠性，需采取多项应对策略。卫星设计制造阶段，加强抗辐射和抗干扰能力，采用抗辐射加固电子元器件，设计冗余备份系统，确保设备故障时能迅速切换备份设备。建立完善的空间环境监测和预警系统，实时监测太阳活动、宇宙射线和空间碎片，及时发布预警，便于运营商提前应对，如调整卫星工作模式、轨道以避开风险。优化链路设计，采用自适应调制解调技术，根据空间环境变化调整调制方式和编码速率，同时增加链路冗余度，通过多路径传输和分集接收技术，如多颗卫星同时传输信号，接收端合并信号，减少链路中断概率。

6.3 卫星互联网安全风险的级联防护挑战

卫星互联网承载网连接星间链路、星地链路、地面信关站和核心网络，既承载用户业务数据，也传输路由状态、控制指令和网络管理信息，是卫星互联网安全防护的关键环节。与相对静态的地面网络相比，卫星互联网具有节点高速运动、拓扑持续变化、无线链路开放、星上资源受限和在轨维护困难等特点。当星间链路、星载设备、信关站或路由控制系统中的某一环节受到攻击时，安全影响可能沿着数据平面和控制平面快速扩散，引发路由振荡、流量拥塞、业务中断和大范围节点失联等承载网级联效应。

（1）星间链路窃听、伪造与重放

星间链路可能面临信号窃听、流量分析、身份伪装、中间人攻击

和控制报文重放等威胁。激光星间链路具有波束窄、空间截获难度高等特点，但并不意味着其天然安全；一旦激光终端、星载密钥或相邻卫星节点被攻破，攻击者仍可能获取链路数据或向网络注入伪造报文。对于微波星间链路，还需要考虑旁瓣截获、非法信号注入和无线干扰等风险。

单条星间链路被攻破后，攻击者可能进一步伪造邻接关系、传播错误拓扑信息或窃取其他节点的通信数据，使安全事件由单链路向多个卫星节点扩散。对此，应在星间和星地链路建立双向身份认证，采用经批准的密码算法对业务数据、路由报文和控制指令分别实施机密性与完整性保护；采用认证加密、序列号、时间戳和滑动窗口机制防止报文伪造与重放；为不同卫星、不同链路和不同业务建立相互隔离的会话密钥，避免单个密钥泄露影响整个星座。同时，应建立在轨密钥更新、吊销和应急替换机制，在发现节点异常后及时撤销其信任关系。CCSDS 355.0-B-2 空间数据链路安全协议可为星间、星地链路的认证与加密提供参考，采用 IP 承载时还可结合 IPsec 实施网络层保护。

（2）星上载荷与软件篡改

星载路由器、交换机、通信载荷和网络操作系统可能因软件漏洞、供应链风险、非法指令或不安全的软件升级受到篡改。攻击者一旦获得星上高权限，不仅能够修改转发表、关闭通信载荷或窃取密钥，还可能利用星间链路攻击相邻卫星，使单星失陷演变为星座内部的横向渗透。

在设备侧，应建立以硬件信任根为基础的安全启动和度量启动机制，对引导程序、操作系统、协议栈、路由策略和应用软件进行逐级签名验证；星上软件和配置更新应采用数字签名、版本校验、双人授权及防回滚机制，并保留经过验证的安全版本和独立恢复分区。星载承载设备内部应对测控、网络控制、载荷处理和用户业务进行安全分区，实施最小权限、强制访问控制和进程隔离，避免用户业务面漏洞直接影响测控和网络控制功能。

运行过程中，可对固件哈希值、关键进程、内存状态、权限变化和控制指令建立完整性基线，并通过远程度量或周期性遥测进行验证。当检测到启动度量不一致、未授权配置变化或异常控制指令时，应立即阻止相关更新或指令执行，将节点切换至受限运行模式，并由相邻节点绕开该卫星转发流量。NASA 空间系统安全建议同样强调安全启动、运行时完整性检查、软件密码验证和关键功能隔离。

（3）地面信关站 DDoS 攻击

信关站承担卫星业务流量汇聚、星地协议转换和与地面骨干网互联等功能，容易成为容量型、协议型和应用型分布式拒绝服务攻击的集中目标。攻击者可以通过大量非法终端接入、伪造数据流、连接耗尽或高频控制请求占用星地带宽、信关站处理能力和控制平面资源。

当某一信关站发生拥塞或不可用时，大量业务会切换至其他信关站和星间路径，可能进一步造成相邻链路拥塞、路由频繁调整和控制器负载升高，形成“信关站过载—流量迁移—星间拥塞—路由振荡”的级联过程。因此，应采用多信关站异地部署和负载分担，避免业务

长期集中于单一出口；在地面骨干网入口部署流量清洗、源地址验证、访问控制和异常流量限速机制，并按照用户、终端、波束和网络切片设置差异化的连接数与带宽配额。

信关站还应对业务平面与管理控制平面进行隔离，对路由协议、SDN 控制接口和设备管理接口实施控制平面保护，限制单位时间内的连接建立、路由更新和管理请求数量。监测系统应持续采集链路利用率、报文速率、连接建立速率、队列占用、丢包率和处理器负载。当攻击达到预设阈值时，可依次执行限速、流量清洗、攻击源封禁、业务分流和远程触发黑洞等操作，同时优先保障测控、应急和重大行业业务。

（4）路由劫持与控制平面攻击

卫星互联网承载网拓扑高度动态，路由系统需要频繁处理链路建立、链路断开和卫星切换信息。攻击者可能通过伪造路由通告、篡改链路度量、冒充控制器或下发恶意流表，将业务流量引向受控节点，造成流量窃听、转发环路、黑洞路由和局部链路拥塞。如果错误路由被其他节点继续传播，可能引发全网路径重计算和大范围业务中断。

针对域内路由，应对 OSPF、IS-IS 或专用星间路由协议的邻接建立和路由更新实施密码认证，并利用序列号、时间戳和报文有效期保证路由信息的新鲜性。针对星座与地面互联网之间的域间路由，可采用 RPKI 路由起源验证，并根据部署条件引入路径验证机制，防止非法前缀和错误路径传播。对于 SDN 或集中式控制架构，应对控制器、星载交换节点和编排系统进行双向认证，保证流表、配置和拓扑数据

均经过签名和授权校验。

卫星路由安全还可利用轨道运行的可预测性建立拓扑合理性校验。例如，将路由通告中的邻接关系、链路持续时间和传播时延与轨道星历及链路计划进行比对，拒绝物理位置上不可能建立的邻接关系。对于突然出现的大量路由更新、路径长度异常增加、下一跳频繁变化和流量偏离基线路径等情况，应通过多源信息交叉验证，必要时冻结可疑路由、回退至上一稳定策略并启用预计算备份路径。

（5）承载网级联效应的整体控制

针对上述威胁，卫星互联网承载网应形成“可信接入—链路保护—节点完整性—路由验证—持续检测—隔离恢复”的纵深防御体系。身份和密钥体系应覆盖卫星、信关站、控制器、终端和运维人员，避免因网络位置或设备归属而给予隐式信任；数据平面、控制平面和管理平面应分别设置安全域和访问策略，限制攻击在不同业务和控制域之间横向传播。

安全监测平台应联合分析星上遥测、星间链路状态、信关站流量、路由变化和控制器日志，识别单点异常向多节点扩散的趋势。发现攻击后，应按照“阻断攻击源—隔离异常节点—切换备份路径—保障关键业务—恢复可信状态—开展审计溯源”的顺序进行处置。对于暂时无法完成远程修复的卫星，可撤销其密钥和路由发布权限，使其进入最小功能安全模式，避免单星失陷进一步演变为全星座安全事件。

6.4 星地融合条件下的端到端 QoS 保障挑战

星地融合是卫星互联网发展的必然趋势,通过将卫星网络与地面网络有机结合,可实现全球无缝覆盖和高效通信,但融合过程中面临诸多难题,对承载网端到端 QoS 构成严峻挑战。

星地网络的异构性是主要难题之一。卫星网络传输延迟大、带宽有限、链路稳定性差,地面网络则传输延迟小、带宽充足、链路稳定性高,二者在网络架构、通信协议、传输特性等方面差异显著,导致融合后承载网出现协议不兼容、数据格式转换复杂等问题,影响端到端 QoS,例如协议差异会增加数据传输延迟和丢包率。

星地网络的动态性也带来挑战。卫星运行使星地通信链路的长度、延迟、信号强度等动态变化,地面网络拓扑也随用户移动和设备增减改变,导致承载网难以维持稳定端到端连接,降低数据传输可靠性和稳定性,如卫星切换地面站时可能出现数据传输中断。

资源分配不均同样影响 QoS。卫星网络资源有限,地面网络资源相对充足,融合后如何合理分配资源满足不同用户需求是难题,分配不当会导致部分用户服务质量受影响,如卫星网络用户过多可能引发带宽拥堵,而地面网络资源可能闲置。

星地链路的不对称性也不利 QoS,上行和下行链路在带宽、延迟等方面差异大,降低数据传输效率,如上行带宽窄可能导致数据积压、延迟增加,下行带宽宽可能资源闲置。

应对策略方面,需推动星地网络协议融合与统一,制定统一标准,

优化改进现有协议，开发新型协议；采用智能资源管理和调度技术，实时监测分析资源，动态调整分配策略，建立资源共享机制；优化切换机制，采用快速切换和多连接技术，减少中断，保证传输连续性；针对链路不对称性采用链路均衡技术，平衡负载，提高效率；构建端到端 QoS 保障体系，对业务分类分级，建立监测评估机制，优化网络性能。

6.5 超大规模星座的路由与管控复杂度挑战

随着卫星批量制造、组网发射和星间链路技术逐步成熟，卫星互联网正在由试验星和几十颗卫星组成的小规模系统，向百星级在轨组网以及千星、万星级巨型星座演进。截至 2026 年 6 月，千帆星座在轨卫星数量已达到 200 颗，我国卫星互联网已进入百星级组网和运行管控阶段；从国内外已公布的星座规划看，未来网络规模将进一步扩展至数千乃至上万颗卫星。

星座规模扩张并不是卫星数量的简单线性增加，而会引起网络状态空间、节点关联关系和控制复杂度的快速增长。设星座包含(N)个卫星节点和(E)条星间链路，则基础拓扑状态规模约为($O(N+E)$)；如果控制系统需要维护不同源宿节点之间的路径或策略关联，其潜在状态规模可能达到($O(N^2)$)。当星座由 100 颗扩展到 1000 颗时，节点数量增加 10 倍，而潜在源宿关联关系将由约(10^4)增长至(10^6)，增加约 100 倍；扩展至 10000 颗卫星时，潜在关联关系将达到约(10^8)，是百星级系统的约 10000 倍。

一方面，高动态拓扑使星间链路状态持续变化。低轨卫星高速绕地运行，相邻卫星的可见关系、链路距离和通信质量随时间变化，异轨道面链路和星地馈电链路还会频繁建立、切换和断开。轨道运动引起的拓扑变化具有一定可预测性，可以根据星历和链路计划提前计算；但设备故障、天气变化、链路遮挡、突发干扰和业务拥塞具有较强的不确定性，需要承载网实时感知并动态响应。如果每一次链路变化都触发全网状态传播和路由重计算，将产生大量控制信令，甚至使路由计算速度无法跟上拓扑变化速度。

另一方面，路由计算和更新收敛面临显著压力。传统链路状态路由需要在链路变化后传播状态信息，并重新执行最短路径计算。采用典型最短路径算法时，单次计算复杂度通常与 $O(E \log N)$ 相关；在万星级星座中，如果多个链路在相近时间内变化，并分别触发全网路由计算和转发表更新，容易形成计算任务堆积、控制报文竞争和路由振荡。若路由收敛时间接近甚至超过部分星间链路的有效持续时间，新生成的路径可能在下发完成前已经失效。因此，超大规模星座不能完全依赖链路变化后的被动响应，而需要将轨道预测、路由预计算和在线增量调整相结合。

控制器同样面临状态采集、策略计算和策略下发三个方面的可扩展性问题。在状态采集阶段，控制器需要汇聚卫星位置、星间链路质量、缓存队列、业务负载和设备健康状态；在策略计算阶段，需要同时处理路径选择、流量工程、资源分配和故障恢复；在策略下发阶段，还需要将转发表和控制参数及时传递至大量星载节点。随着节点和业

务数量增加，控制器的计算、存储、接口吞吐和控制通道带宽均可能成为系统瓶颈。

集中式控制具有全局网络视图，便于开展全局路由优化和资源编排，但容易受到星地控制时延、控制通道中断和中心节点负载的限制，并存在单点故障或局部过载风险。纯分布式控制能够由卫星节点完成局部路由和快速故障恢复，但需要各节点持续交换状态信息，可能产生较大的星间控制开销；同时，不同节点获得的网络状态存在时间差，容易出现决策不一致、转发环路和局部最优等问题。因此，从百星级向千星、万星级演进时，单一集中式或纯分布式架构均难以同时满足全局优化、快速响应和低控制开销要求。

未来更可行的方向是构建“全局规划—分域控制—星上自治”的分层混合管控架构。地面全局控制器根据轨道运行规律、长期业务需求和网络资源状况，生成基础拓扑计划和全局资源配置策略；区域或轨道域控制器负责域内路由、流量工程和跨域协调；星载节点则根据局部链路和队列状态完成邻接维护、快速保护和故障绕行。在时间尺度上，可采用“长期拓扑预计算、中期资源优化、短期局部快速重构”的多时间尺度机制，避免每一次局部变化都触发全网重新计算。

发生卫星失效、星间链路中断或局部拥塞后，承载网还需要按照“异常检测—故障隔离—局部修复—分域重路由—全局再优化”的顺序快速重构。可通过预置备份下一跳、关键业务双路径传输、增量式路由计算、链路变化事件合并以及控制器主备部署等方式缩短业务中断时间。对于无法立即恢复的区域，应优先保障测控、应急通信和重

大行业业务，并通过限速、降级和负载迁移防止局部故障进一步演变为全网拥塞。

总体而言，超大规模星座承载网管控的核心问题，是在持续变化的网络状态与有限的星上、星地控制资源之间取得平衡。其发展重点将由百星级系统中的“集中监测和统一控制”，逐步转向千星、万星级系统中的“预测驱动、分层分域、局部自治和智能协同”。这既要求突破高动态路由、增量计算和控制器弹性扩展技术，也需要建立面向故障和拥塞的快速重构机制，使承载网能够在规模持续扩大的情况下保持可管、可控、可恢复。

6.6 海量终端直连的业务承载挑战

随着非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）技术不断成熟，卫星通信的服务对象正由数量相对有限的卫星电话、船载站和便携站等专用终端，逐步扩展到普通 4G/5G 手机、物联网终端、车载终端和可穿戴设备。手机直连卫星（Direct-to-Device, D2D，本文不指终端间的 Device-to-Device 通信）降低了卫星通信的终端门槛，使卫星网络具备面向大规模公众用户提供广域连接的能力。3GPP 自 Release 17 起将 NTN 纳入规范体系，相关业务也正由短消息和低速物联连接向语音、数据等综合业务演进。由此带来的影响不仅体现为接入终端数量增加，还将沿“用户接入—波束汇聚—星上转发—星间骨干—信关站出口”的路径向承载网传导，使卫星互联网承载模式由面向少量专用终端的连接保障，转变为面向海量移动终端的动态业务汇聚。

首先，终端规模的数量级提升将显著增加承载网的流量汇聚和会话保持压力。传统卫星通信业务的用户数量、终端类型和流量模型相对可控，而普通移动终端和物联网终端接入后，同一卫星、同一波束覆盖范围内可能同时存在大量注册用户和在线会话。即使单个终端的平均业务速率较低，大量终端产生的周期性上报、状态更新和业务请求叠加后，也会增加星上交换、缓存、队列调度以及地面出口的处理负荷。承载网不仅需要满足峰值吞吐量要求，还需要具备大规模会话状态维护、小流量高并发报文处理和多业务并行承载能力。

其次，D2D 业务具有明显的时空突发性，容易造成局部波束和星间链路过载。在自然灾害、重大活动、地面网络中断以及偏远区域集中作业等情况下，大量用户可能在短时间内同时发起注册、位置更新和业务连接请求，形成接入请求与业务流量的双重突发。流量经过服务卫星汇聚后，可能进一步集中到少数星间链路、跨轨道面链路或信关站出口，形成承载热点。尤其是在信关站分布不均衡或地面出口距离较远的区域，业务需要经过多跳星间转发才能进入地面核心网，热点链路的拥塞可能向相邻卫星和其他路径扩散，导致排队时延增加、丢包率上升甚至业务中断。

再次，业务类型由短消息向语音和数据演进，将改变承载网的流量特征和服务质量要求。短消息和低速物联网业务通常流量较小，并能够容忍一定的传输时延；语音业务具有持续占用、低时延和低抖动要求；网页访问、图片和视频等数据业务则具有较强的突发性，并可能长时间占用较大带宽。因此，承载网不能再采用单一的尽力而为传

输方式，而需要根据业务重要程度、实时性和带宽需求实施差异化保障。例如，应急呼叫、告警信息和网络控制信令应获得最高优先级；语音和交互类业务应重点保障时延与抖动；短消息和物联网业务应重点保障可靠送达；普通数据下载则可根据网络负荷进行弹性调度。

此外，低轨卫星和波束相对地面的高速移动，使普通移动终端即使处于静止状态，也可能频繁发生跨波束、跨卫星切换。终端注册、位置更新、链路测量、认证鉴权、会话迁移和路由重定向等过程将产生大量控制信令。随着终端规模扩大，控制信令负荷可能比用户面流量增长得更快，并通过星地链路和承载网控制平面持续传递。若切换与路由更新机制缺乏协同，容易出现业务路径频繁变化、重复状态同步以及瞬时信令拥塞等问题。因此，需要结合卫星轨道和波束覆盖规律进行预测性切换与路由预配置，减少不必要的全网状态传播和逐终端控制操作。

针对上述压力，卫星互联网承载网需要建立面向海量终端的分层汇聚、弹性调度和过载保护机制。一是以波束、卫星、星间链路和信关站为层级开展负载监测与容量管理，重点监测每波束在线终端数、单位时间接入与切换请求数、业务流量峰均比、星上队列占用率、星间链路利用率以及信关站出口负荷。二是通过分级接纳控制、接入类别限制、退避重试和速率整形等机制，抑制突发接入形成的信令风暴。三是采用负载感知的多路径路由、流量工程和信关站动态选择机制，将热点链路上的业务疏导至具备剩余容量的星间路径和地面出口。四是实现移动网络服务质量标识与卫星承载队列、网络切片及路由策略

的映射，形成端到端的差异化 QoS 保障。五是结合轨道运行规律、人口分布和历史业务模型预测区域流量变化，提前调整星间链路资源、路由策略和地面出口容量。

在应急通信场景下，还应设置独立的应急业务保障策略，包括预留承载资源、限制非关键业务接入、提高应急呼叫和告警信息优先级、允许高优先级业务抢占低优先级资源，以及采用存储转发方式保障短消息和灾情数据最终送达。当局部网络容量不足时，可按照“控制信令与告警信息—应急语音—普通消息—一般数据业务”的顺序实施分级保障和服务降级，避免大量用户同时接入造成承载网整体失稳。

总体来看，海量终端直连使卫星互联网承载网面临的核心问题由“能否连通”进一步转变为“如何稳定汇聚、差异化承载并在突发条件下保持服务连续”。未来承载网需要由静态容量配置向可预测、可弹性调度的资源管理方式演进，并加强接入控制、星上处理、星间路由和地面出口之间的协同，才能支撑手机直连卫星业务由应急补充服务向规模化公众通信服务发展。

七、卫星互联网承载网发展趋势

本章围绕卫星互联网承载网的未来发展趋势，重点从星地融合与泛在互联、高速光网络与弹性承载、多轨协同与网络韧性、通算智融合与智能自治、安全开放与自主可控五个方面，分析其网络形态变化、关键实现路径和重点演进方向。

7.1 星地融合与泛在互联演进

卫星互联网早期主要以单颗卫星或同轨星座为单位提供通信服务，卫星系统与地面移动通信网、互联网和行业专网之间相对独立，业务通常需要通过专用终端、专用信关站和协议转换设备接入。随着非地面网络技术发展，卫星网络将逐步由地面网络的补充通信手段转变为空天地一体化网络的组成部分，卫星接入、星间传输、地面骨干承载和核心网业务控制将由分段建设向端到端协同演进。3GPP 从 Release 17 开始形成 NTN 规范性要求，并在 Release 18 中进一步推动卫星接入与 5G 系统融合，为卫星网络复用移动通信的用户管理、会话控制、QoS 和漫游机制提供了标准基础。

在空间网络内部，高、中、低轨卫星将由相对独立运行向多轨协同组网演进。高轨卫星覆盖范围大、可见时间长，适合作为稳定的区域覆盖、控制支撑和中继节点；中轨卫星可以承担跨区域汇聚和多层网络衔接；低轨卫星具有传播时延低、空间复用度高的特点，适合提

供用户接入和高容量星间传输。未来可通过多轨统一寻址、拓扑抽象和分层路由机制，将不同轨道卫星组织为具有差异化功能的网络层级，并根据业务位置、时延要求和链路状态，在不同轨道和不同出口之间动态选择承载路径。

在天地网络之间，演进重点将由简单协议转换转向网络功能和业务机制融合。卫星网络需要逐步支持与地面 5G/6G 核心网、IP 骨干网、云网络和行业专网统一的身份认证、地址管理、业务分类及服务质量映射。地面信关站也将由单纯完成信号注入和卸载的通信站点，转变为集协议适配、业务分流、边缘计算和跨域控制于一体的融合网络节点。对于复杂地形、远洋和航空等场景，还可引入高空平台、无人机中继和地面移动网络，形成卫星、高空平台与地面网络相互补充的多层连接体系。

手机直连卫星将进一步推动卫星互联网服务对象由少量专用终端向普通手机、物联网设备、车辆和可穿戴设备扩展。其业务形态将由应急短消息和低速物联连接，逐步向语音、数据及综合信息服务演进。相应地，承载网需要实现卫星接入与移动核心网之间的会话连续性，并在终端跨波束、跨卫星和跨网络移动过程中协同调整承载路径。面向海量终端，还需要在波束、卫星、星间链路和信关站之间实施分层流量汇聚与负载均衡，避免接入规模扩大后形成星上和星间骨干热点。

因此，星地融合的最终形态不是简单增加一种卫星接入方式，而是推动卫星网络与地面网络由“接口互通”向“体系融合”发展。承

载网将逐步形成覆盖空间、空中和地面的统一传输体系，使用户能够根据所在区域和网络状态在卫星与地面网络之间平滑迁移，并支撑跨运营商、跨区域和跨行业的连续服务。

7.2 高速光网络与弹性承载演进

当前卫星互联网仍以微波星地链路和星间链路为重要传输手段，链路容量受到频谱资源、天线口径和空间电磁环境等因素制约。随着激光通信终端、高精度捕获对准跟踪、高速调制编码和空间光器件逐步成熟，星间及星地传输将由以微波链路为主，向“光通信承担高速骨干传输、微波通信提供接入与可靠补充”的光电融合方式演进。欧洲航天局已经围绕太比特每秒级光链路制定相关技术规范，并通过高吞吐量光网络项目探索跨低轨、中轨和高轨的空间光网络，说明 Tbps 级传输更适合作为未来空间光骨干的发展目标，而不是现阶段所有星间链路的通用能力。

在星间网络中，激光通信的应用将由建立点到点高速链路，进一步发展为构建可组网、可调度的空间光骨干。初期可在相邻卫星之间建立相对固定的高速光链路，并保留微波链路作为控制通道或备份路径；随后通过多激光终端、可重构光连接和跨轨道面链路，形成网状星间拓扑；远期则可探索波分复用、光交换和光电协同转发，使卫星具备对多方向光链路进行容量组织和路径调度的能力。承载网的建设重点也将由提高单条链路速率，转向提升端到端路径容量、网络连通性和业务可用带宽。

高速链路形成后,承载网还需要从静态带宽配置向按需弹性调度演进。卫星运动会使网络拓扑和链路时延周期性变化,不同区域的业务需求也随人口分布、时区、重大活动及突发事件发生变化。如果仍按照固定路径和平均负荷配置资源,容易出现部分链路拥塞而其他链路闲置的问题。因此,需要结合轨道星历、链路计划和业务预测,提前生成不同时段的基础拓扑与候选路径;在网络运行过程中,再根据链路质量、队列状态和业务优先级进行增量调整。

多路径传输和流量工程将成为实现弹性承载的重要手段。承载网可同时利用多条星间路径、多个信关站出口以及卫星与地面骨干网的组合路径,根据业务的带宽、时延、可靠性和安全需求选择转发策略。对于高可靠业务,可采用双路径保护或重要数据冗余传输;对于大带宽业务,可通过多链路聚合提升吞吐量;对于普通数据业务,可根据网络负载延迟调度或选择成本较低的路径。IPv6、MPLS 和 SRv6 等机制可为路径显式控制和跨域流量工程提供基础,但仍需要结合卫星网络动态拓扑、有限星上存储和报文头开销进行适应性优化。

总体来看,卫星互联网承载网的传输方式将经历由“微波连接为主”向“光电融合”、由“点到点高速链路”向“可重构空间光网络”、由“固定容量配置”向“业务驱动的弹性承载”转变。评价重点也将由单链路峰值速率,逐步转向端到端吞吐量、容量利用率、路径可用性和业务保障效果。

7.3 多轨协同与网络韧性演进

多轨协同不仅用于扩大网络覆盖范围，还将成为提高卫星互联网承载网可靠性和抗毁能力的重要路径。单一轨道星座虽然能够通过增加卫星数量提升覆盖和容量，但仍可能受到同类链路故障、轨道面局部中断、信关站不可用及区域性干扰等影响。未来承载网将利用高、中、低轨卫星在覆盖范围、传播时延、链路稳定性和节点密度等方面的差异，构建跨轨道、跨链路和跨网络的冗余承载体系。

在正常运行状态下，可根据业务特征实施差异化多轨承载。低时延和高交互业务优先通过低轨星座传输，广域广播、控制信息和区域性稳定业务可由中高轨卫星提供支撑，跨洲或跨洋业务则可在星间光网络、地面光纤骨干网和不同轨道卫星之间选择综合性能更优的路径。通过统一的多轨拓扑视图和跨域路径计算，承载网可将不同轨道资源由相互独立的容量单元，转化为能够按需组合的网络资源池。

在故障和拥塞状态下，承载网将由故障发生后的被动重路由，向预测性保护和分层快速恢复演进。对于由轨道运动引起的可预测链路建立与断开，可依据星历和链路计划提前计算下一时段的拓扑及转发表，并在链路切换前完成路径迁移。对于设备故障、突发干扰、天气影响和业务拥塞等不可预测事件，可由星载节点完成邻接检测和局部快速绕行，由轨道域或区域控制器完成分域重路由，再由地面全局控制器进行资源再优化，形成“本地保护—分域恢复—全局调整”的多层恢复机制。

天地多路径保护是提升端到端韧性的另一重要方向。关键业务可
同时建立星间主备路径、多个信关站出口以及地面骨干备份通道，避
免单颗卫星、单条链路或单个地面站故障导致业务中断。信关站应逐
步由单站接入向多站协同和异地容灾发展，控制器、认证系统和网络
管理平台也需要采用分布式或主备部署，防止控制平面失效引起大范
围业务中断。

在灾害救援和重大活动等应急场景下，承载网还需要由统一服务
保障向分级服务保障演进。通过预留应急容量、设置专用网络切片、
实施优先级调度和业务抢占，可以优先保证指挥控制、告警信息和应
急语音业务。在局部网络严重过载或链路间歇可用时，可采用短消息
存储转发、数据压缩、业务降级和延迟容忍传输等方式，确保关键数
据最终送达，避免追求所有业务正常运行导致网络整体失稳。

因此，网络韧性的评价对象将由单条链路或单颗卫星的可靠性，
转向端到端业务的连续性和整个承载体系的可恢复性。承载网将逐步
形成能够预测拓扑变化、隔离故障影响、快速重构路径并按业务重要
程度实施降级保障的韧性运行机制。

7.4 通算智融合与智能自治演进

随着星载处理器、存储器和智能载荷能力提升，卫星将由主要承
担信号转发的通信节点，逐步转变为兼具通信、计算、存储和智能处
理能力的网络节点。卫星互联网承载网也将由单纯提供数据传输通道，
向同时承担数据传输、任务处理和资源协同的通算智融合基础设施演

进。其核心变化是部分数据和任务不再全部回传地面处理，而是根据时延、带宽、能耗和安全要求，在卫星、信关站、地面边缘节点和云数据中心之间选择适当的处理位置。

星上处理将首先应用于数据压缩、协议处理、缓存、业务识别和简单推理等对资源需求相对可控的任务，减少原始数据回传造成的带宽占用。随着星上算力和能源管理能力提升，可进一步支持遥感数据筛选、异常事件识别、模型推理和多星协同处理。承载网需要同步具备计算节点发现、任务流识别、服务功能链编排以及计算和带宽联合调度能力，根据任务时限、数据位置、节点负载和链路状态决定任务在星上处理、跨星迁移还是卸载至地面。

在网络管控方面，超大规模星座将推动承载网由地面集中控制向“地面全局规划—轨道或区域分域控制—星上局部自治”的分层架构演进。地面全局控制器负责网络策略、长期资源规划和跨域协调；轨道域或区域控制器负责域内路由、容量调度和故障恢复；星载节点则根据邻接链路、队列和设备状态完成快速转发调整。通过这种分层机制，可以减少海量状态集中上报和控制策略逐节点下发产生的信令压力，同时兼顾全局资源优化与局部快速响应。

多时间尺度管控将成为分层自治的重要实现方式。在较长时间尺度上，根据轨道规律、历史业务和星座运行计划进行拓扑预计算与容量规划；在中等时间尺度上，根据区域业务负荷调整星间链路、路由策略和信关站出口；在较短时间尺度上，由星载节点根据链路故障、瞬时拥塞和队列变化实施快速保护。网络数字孪生平台可在地面构建

与实际星座同步的虚拟网络，用于拓扑推演、策略验证、故障模拟和容量评估，并将验证后的策略下发至实际网络，降低在线试错风险。

人工智能将由辅助离线分析逐步进入网络运行闭环，可用于预测卫星链路质量和区域业务需求、识别异常流量与设备故障、优化路由和资源配置。但卫星互联网承载网属于高可靠基础设施，不能完全依赖缺乏约束的黑盒决策。更可行的路径是将轨道模型、通信机理、规则策略和数据驱动方法结合起来，由人工智能生成候选方案，再通过安全约束、仿真验证和策略审计后执行；对于关键测控、安全和应急业务，应始终保留确定性策略和人工接管机制。

由此，卫星互联网承载网的智能化将由“使用人工智能算法”进一步发展为“形成可感知、可预测、可决策、可执行和可验证的自治闭环”，网络控制方式也将由地面集中、事后响应，逐步转向分层协同、预测驱动和局部自治。

7.5 安全开放与自主可控演进

卫星互联网承载网连接空间节点、地面站、运营商网络、云平台和海量用户终端，网络边界将随着星地融合和多主体接入不断扩展。传统依赖网络位置和静态边界的安全机制难以适应节点高速移动、链路动态变化和跨域业务协同，未来安全体系将由外围防护向覆盖身份、链路、节点、路由、控制和运营全过程的零信任与纵深防御架构演进。

在身份与节点安全方面，需要建立覆盖卫星、信关站、控制器、终端和运维主体的统一身份与密钥体系，对每次接入和控制操作进行

持续认证与授权。星载设备将逐步引入安全启动、可信执行环境、软件完整性校验、远程证明和安全升级机制，确保星上操作系统、路由软件和任务载荷处于可信状态。在链路和网络安全方面，应综合采用星间与星地链路加密认证、路由信息验证、控制信令保护和多源异常检测，形成“可信接入—加密传输—完整性保护—持续监测—隔离恢复”的闭环。CCSDS 空间数据链路安全协议已经为航天数据链路的认证和保密提供了标准化基础，后续还需要加强其与 IP 网络安全及移动通信安全机制的衔接。

面向量子计算可能对传统公钥密码体系带来的长期风险，承载网安全将由固定密码算法向密码敏捷和抗量子迁移演进。近期应优先建立可升级的密码算法框架和全网密钥生命周期管理能力，并结合星载计算资源评估后量子密码算法的计算、存储和报文开销；对于具备稳定光链路和专用设备条件的场景，可进一步研究量子密钥分发等技术。量子安全不宜简单等同于在所有卫星链路上部署量子通信，而应形成由成熟密码机制、后量子密码和特定场景量子密钥技术共同构成的分阶段演进路线。

在开放兼容方面，卫星承载网将由封闭专用协议向兼容 IPv6、SRv6、5G/6G 和 CCSDS 等标准体系演进。通过统一寻址、标准化南北向接口和网络能力开放接口，可实现星载设备、地面网络、管控平台和业务系统之间的解耦，并支持卫星运营商、地面运营商、云服务商和行业用户协同提供服务。SRv6 等机制可用于跨星地网络的路径编排和服务链组织，但相关方案仍需针对星上处理能力有限、链路动

态变化和报文头开销等问题进行优化。开放接口同时必须实施身份认证、最小权限、调用限速和全过程审计，避免网络能力开放扩大攻击面。

在自主可控方面，发展重点将由单项设备或器件替代，转向覆盖核心芯片与器件、星载路由交换设备、星地融合网关、网络操作系统、控制器、协议软件和测试验证工具的全栈能力建设。通过推进软硬件解耦、统一接口、模块化设计和开放测试规范，可以减少不同厂商设备之间的适配成本，形成可持续迭代的产品体系和软件生态。自主可控也不意味着形成封闭技术体系，而是在掌握核心技术和关键供应链的基础上，积极兼容国际通用标准，并通过标准、接口和开源生态提升产业协同能力。

总体来看，安全、开放与自主可控并非彼此独立的发展方向。安全可信是多主体开放协同的前提，开放标准是形成规模化产业生态的基础，自主可控则是保障承载网长期稳定运行和持续演进的关键。未来卫星互联网承载网将由单点安全防护、专用接口和分散产品供给，逐步走向全生命周期安全、标准化能力开放和软硬件协同发展的产业体系。

综上，卫星互联网承载网的发展将沿着星地融合、高速光互联、多轨韧性、通算智融合以及安全开放五条路径持续演进。这些路径分别承接第一章提出的泛在覆盖与全域互联、高速传输与弹性承载、连续服务与可靠保障、智能协同与高效管控、安全可信与开放兼容等能力愿景，但侧重点由目标描述转向实现方式和形态变化。其最终结果

不是单项链路速率、卫星数量或星上算力的简单提升，而是形成架构统一、资源协同、运行自治、服务连续且产业基础稳固的卫星互联网承载体系。

八、总结与展望

当前，卫星互联网正由单星通信和试验验证向规模化组网、星地融合及公众服务加速演进，卫星节点也由传统透明转发载荷逐步发展为具备交换、路由、处理和协同能力的网络节点。作为贯通卫星接入网络、星间骨干网络、地面信关站以及地面核心网和骨干网的“太空信息高速公路”，卫星互联网承载网直接决定着卫星互联网的业务汇聚、跨域传输、资源调度和服务保障能力，是构建空天地一体化信息基础设施的重要组成部分。

从发展需求和应用空间看，卫星互联网承载网不仅承担偏远地区、远洋、航空和极地等区域的广域连接任务，还将在应急通信、手机直连卫星、低空经济、智慧农业、跨境物流以及“一带一路”沿线数字连接等场景中发挥重要作用。随着星座规模由几十星、百星向千星和万星扩展，服务终端由专用设备向普通 4G/5G 手机、物联网终端和车载终端延伸，承载网所面对的网络规模、业务类型和运行环境正在发生深刻变化。与此同时，轨道与频谱资源约束、复杂空间环境、星地网络异构、安全风险级联、端到端 QoS 保障、超大规模星座管控以及海量终端业务汇聚等问题，也对承载网的可扩展性、可靠性和智能化水平提出了更高要求。

本白皮书围绕卫星互联网承载网的需求、架构、技术、产业、标准、挑战和趋势进行了系统梳理。在体系架构方面，分析了集中式、

分布式和混合式三类典型架构的基本原理、适用条件与选型依据；在关键技术方面，形成了由星间/星地高速链路与传输、星上交换与转发、高动态网络路由、高动态移动切换、网络管控与异构资源编排、网络感知建模与数字孪生、安全与可信保障、测试验证与性能评估构成的八项关键技术体系；在产业方面，构建了涵盖上游、中游和下游三个层次，以及核心芯片与基础器件、星载承载网设备、星地融合承载设备、网络系统与管控平台、协议与软件生态、测试验证、运营服务七个板块的产业链框架；在标准化方面，梳理了 3GPP、IETF、ITU、CCSA、SAC/TC425 等组织的相关进展，并分析了不同标准体系之间的协同关系、现有空白与推进方向。

综合来看，我国卫星互联网承载网已具备从关键技术突破向体系化发展迈进的基础，但在核心芯片和星载网络设备自主可控、超大规模网络稳定运行、星地协议深度融合、端到端服务质量保障、安全可信防护以及测试验证体系建设等方面仍需持续加强。未来的发展不应局限于单项性能指标提升，而应更加注重架构、技术、产业和标准之间的协同，推动形成可组网、可运营、可扩展、可管控和可持续演进的卫星互联网承载体系。

面向下一阶段，建议重点从以下五个方向推进卫星互联网承载网建设。一是面向泛在覆盖与全域互联，加快高、中、低轨卫星协同组网，深化卫星网络与地面 5G/6G、骨干网及高空平台的融合，提升手机直连卫星和全球行业服务能力。二是面向高速传输与弹性承载，突破高速星间和星地激光通信、星上交换、多路径传输及动态流量工程

等关键技术，推动星间网络由连接通道向高容量空间骨干网演进。三是面向连续服务与可靠保障，完善多星多链路冗余、故障快速绕行、天地多路径保护和应急业务优先保障机制，增强承载网在复杂空间环境和突发事件下的韧性。四是面向智能协同与高效管控，推动通信、计算和智能深度融合，发展基于轨道预测、数字孪生和人工智能的网络感知、路由决策与资源编排技术，形成适应千星、万星规模的分层分域和星上自治能力。五是面向安全可信、开放兼容与自主可控，建立覆盖链路、节点、路由、控制和运营全过程的纵深防御体系，加强跨组织标准协同和开放接口建设，推动核心芯片、星载路由交换设备、网络操作系统和管控平台规模化应用。

卫星互联网承载网建设是一项融合通信、航天、计算、人工智能、网络安全和行业应用的系统工程，需要科研机构、设备厂商、卫星运营商、地面运营商、云服务商和行业用户共同参与。未来，应进一步加强基础理论研究、核心技术攻关、标准协同、产业链合作和在轨试验验证，推动我国卫星互联网承载网由单项技术突破迈向体系能力提升，为数字中国建设、“一带一路”互联互通以及全球信息基础设施发展提供安全、可靠、高效的空天地一体化网络支撑。

附录 A：术语与缩略语

中文名称	英文缩写	英文全拼
人工智能	AI	Artificial Intelligence
手机直连 卫星	DTC	Direct to Cell
低地球轨道	LEO	Low Earth Orbit
国际电信 联盟	ITU	International Telecommunication Union
公钥基础 设施	PKI	Public Key Infrastructure
服务质量	QoS	Quality of Service
非地面网 络	NTN	Non Terrestrial Network
第三代合 作伙伴计 划	3GPP	3rd Generation Partnership Project
互联网工 程任务组	IETF	Internet Engineering Task Force
软件定义 网络	SDN	Software Defined Network
网络功能 虚拟化	NFV	Network Functions Virtualization
地球静止 轨道	GEO	Geostationary Earth Orbit
倾斜地球 同步轨道	IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
中地球轨 道	MEO	Medium Earth Orbit
捕获、对 准和跟踪	APT	Acquisition, Pointing and Tracking

低密度奇偶校验码	LDPC	Low Density Parity Check
幅度位置调制	APPM	Amplitude and Pulse Position Modulation
里德-所罗门码	RS	Reed-Solomon
卷积码	CC	Convolutional Code
多输入多输出	MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
开放最短路径优先	OSPF	Open Shortest Path First
分布式哈希表	DHT	Distributed Hash Table
无线电链路中断	RLF	Radio Link Failure
频分双工	FDD	Frequency Division Duplex
全球导航卫星系统	GNSS	Global Navigation Satellite System
简化能力终端	RedCap	Reduced Capability
存储与转发	S&F	Store-and-Forward
星间链路	ISL	Inter-Satellite Link
国际移动通信	IMT	International Mobile Telecommunication
下一代节点 B（5G 基站）	gNB	next Generation Node B
用户设备	UE	User Equipment
往返时间	RTT	Round-Trip Time
硬件在环	HIL	Hardware-in-the-Loop
在轨测试	IOT	In Orbit Testing

用户面功能	UPF	User Plane Function
接入和移动性管理功能	AMF	Access and Mobility Management Function
全球认证论坛	GCF	Global Certification Forum
中国通信标准化协会	CCSA	China Communications Standards Association

参考文献

- [1] 3GPP. Study on satellite access—Phase 3: 3GPP TR 22.865 V19.2.0[R/OL]. 2023[2026-09-07]. <https://www.3gpp.org/dynareport/22865.html>.
- [2] 3GPP. Study on integration of satellite components in the 5G architecture; Phase 3: 3GPP TR 23.700-29 V19.0.0[R/OL]. 2024[2026-09-07]. <https://www.3gpp.org/dynareport/23700-29.html>.
- [3] 3GPP. Study on management aspects of NTN Phase 2: 3GPP TR 28.874 V19.1.0[R/OL]. 2025[2026-09-07]. <https://www.3gpp.org/dynareport/28874.html>.
- [4] 3GPP. Study on security aspects of 5G satellite access in the 5G architecture Phase 3: 3GPP TR 33.700-29 V19.1.0[R/OL]. 2025[2026-09-07]. <https://www.3gpp.org/dynareport/33700-29.html>.
- [5] BIRRANE E III, KUHN N, QU Y, et al. Time-Variant Routing (TVR) use cases: RFC 9657[R/OL]. 2024[2026-09-07]. <https://doi.org/10.17487/RFC9657>.
- [6] LI T. A routing architecture for satellite networks: RFC 9717[R/OL]. 2025[2026-09-07]. <https://doi.org/10.17487/RFC9717>.
- [7] KING D, CONTRERAS L M, SIPOS B, et al. Time-Variant Routing (TVR) requirements: draft-ietf-tvr-requirements-11[R/OL]. 2026[2026-09-07]. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-tvr-requirements-11>.
- [8] MIAO X, DU P, XIAO M, et al. Scenarios and routing requirements for mega-constellation LEO satellite networks: draft-miao-rtgwg-satellite-routing-reqs-00[R/OL]. 2026[2026-09-07]. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-miao-rtgwg-satellite-routing-reqs-00>.

-
- [9] SPACEX. Starlink Direct to Cell service now available[R/OL]. 2025[2026-09-07]. https://starlink.com/public-files/DIRECT_TO_CELL_SERVICE_FEB_25.pdf.
- [10] IZHIKEVICH L, TRAN M, IZHIKEVICH K, et al. Democratizing LEO satellite network measurement[J]. Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems, 2024, 8(1): 13:1-13:26.
- [11] HAMMER S M, ADDANKI V, FRANKE M, et al. Starlink performance through the edge router lens[C]//Proceedings of the 2nd ACM Workshop on LEO Networking and Communication. New York: ACM, 2024: 67-72.
- [12] 央视网. 国家航天局：加快“一带一路”空间信息走廊建设[EB/OL]. (2017-05-13)[2026-09-07]. <https://tv.cctv.com/2017/05/13/VIDE9eIPLmCAj4yyFYADGN88170513.shtml>.
- [13] 新华每日电讯. 太空新基建：中国商业航天提速[EB/OL]. (2025-04-24)[2026-09-07]. <https://www.xinhuanet.com/tech/20250424/9dfb5ef214174fb69f1b182884550b78/c.html>.
- [14] 中国电信. 中国电信直连卫星全场景应用正式发布——天通卫星守护 318 国道“生命线”[EB/OL]. (2025-07-12)[2026-10-09]. <https://www.chinatelecom.com.cn/ct/news/jtxw/153039.html>.
- [15] LIBERG O, LÖWENMARK S E, EULER S, et al. Narrowband and Internet of Things for non-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2020, 4(4): 49-55.
- [16] YUE P, AN J, ZHANG J, et al. Low earth orbit satellite security and reliability: Issues, solutions, and the road ahead[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(3): 1604-1652.
- [17] ZHOU D, SHENG M, LI J, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: A survey and future challenges

-
- nges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 975-1019.
- [18] 工业和信息化部, 中央网络安全和信息化委员会办公室, 教育部, 等. 工业和信息化部等六部门关于印发《算力基础设施高质量发展行动计划》的通知: 工信部联通信〔2023〕180号[EB/OL]. (2023-10-08)[2026-09-07]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_fcb3aa793e674960b1c00d7e3b6ad448.html.
- [19] 阮永井, 胡敏, 云朝明. 低轨巨型星座构型设计与控制研究进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(1): 1-15.
- [20] SALIM S, MOUSTAFA N, REISSLEIN M. Cybersecurity of satellite communications systems: A comprehensive survey of the space, ground, and links segments[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 27(1): 372-425.
- [21] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [22] ZHANG Y, PAN T, ZHENG Y, et al. Topology-adaptive LEO satellite network telemetry via graph isomorphism and topology partitioning[C]//Proceedings of the 9th Asia-Pacific Workshop on Networking. New York: ACM, 2025: 93-99.
- [23] ZHANG Y, PAN T, FU Q, et al. In-band network-wide telemetry for topology-varying LEO satellite networks[C]//GLOBECOM 2024—2024 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2024: 4479-4484.

