

未来网络技术发展系列白皮书（2025）

卫星互联网承载网技术 白皮书

第九届未来网络发展大会组委会

2025年8月

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、郑宇冰、孙士然

前 言

随着 5G、人工智能、空天地一体化等新一代信息技术的迅猛发展，全球数字化进程加速推进，卫星互联网作为实现全域无缝覆盖、支撑数字边疆守护与全球互联互通的关键基础设施，其战略地位日益凸显。与此同时，碳达峰、碳中和战略下绿色低碳发展的要求，以及国家重大战略对通信韧性、产业升级的需求，为卫星互联网技术创新与产业演进提出了更高标准。因此，如何突破轨道/频谱资源约束、空间环境干扰等特殊难题，构建高效、可靠、智能的卫星互联网承载体系，成为推动卫星互联网高质量发展的核心挑战。

传统卫星通信网络存在覆盖局限、资源利用率低、星地协同不足等问题，难以满足全域通信、应急保障、产业赋能等多元化需求。卫星互联网承载网作为连接卫星星座与地面终端的“太空信息高速公路”，通过星间/星地链路技术、动态路由与交换技术等关键技术创新，实现了数据的高效传输与交互，为破解传统网络瓶颈提供了系统性解决方案。

本白皮书首先系统梳理了卫星互联网承载网的发展背景与需求愿景，涵盖国家重大战略、产业经济升级、人民服务保障及全球科技竞争等维度；其次详细阐述了通信增强、应急保障、产业赋能、科学研究等典型应用场景，并深入剖析了集中式、分布式、混合式三种卫星互联网承载网体系架构及星间/星地链路、路由、交换等七大关键技术；同时，本白皮书分析了全球主要卫星互联网的产业现状与标准

化进展，探讨了轨道/频谱资源紧张、空间环境复杂等特殊问题及应对策略，最后对未来发展方向进行了总结与展望。

本白皮书期望为业界提供对卫星互联网承载网的全面认知，促进技术交流与创新协作，推动相关技术在国防安全、应急通信、智慧农业等领域的广泛应用，助力我国卫星互联网产业从“技术并跑”迈向“体系领跑”，为构建空天地一体化信息基础设施、支撑数字中国建设提供有力支撑。

第九届未来网络发展大会白皮书

目 录

前 言	I
目 录	III
一、需求与愿景	1
1.1 国家重大战略需求	1
1.2 产业驱动经济升级	2
1.3 人民服务需求	2
1.4 世界科技引领	3
二、卫星互联网承载网概述	1
三、卫星互联网承载网体系架构	5
3.1 集中式架构	5
3.1 分布式架构	7
3.3 混合式架构	9
四、卫星互联网承载网关键技术	12
4.1 星间/星地链路技术	12
4.2 路由技术	18
4.3 交换技术	22
4.4 移动切换技术	24
4.5 网络管理与控制技术	27
4.6 网络测量技术	31

4.7 仿真与验证技术	34
五、卫星互联网应用场景	38
5.1 通信增强类应用场景	38
5.2 应急保障类应用场景	41
5.3 产业赋能类应用场景	44
5.4 科学研究类应用场景	47
六、卫星互联网承载网产业现状及趋势	50
6.1 Starlink 进展	50
6.2 OneWeb 进展	51
6.3 Amazon Kuiper 进展	52
6.4 星网进展	53
6.5 垣信进展	54
七、卫星互联网承载网标准化现状	56
7.1 3GPP 进展	56
7.2 IETF 进展	58
7.3 ITU 进展	59
7.4 CCSA 进展	61
八、卫星互联网特殊问题剖析	63
8.1 轨道/频谱资源紧张导致承载网容量瓶颈	63
8.2 空间环境复杂导致承载网链路可靠性下降	64
8.3 卫星互联网安全风险的承载网级联效应	65
8.4 星地融合难题对承载网端到端 QoS 的挑战	66

九、总结与展望	68
附录 A：术语与缩略语	70
参考文献	73

第九届未来网络发展大会白皮书

一、需求与愿景

本白皮书创新性提出卫星互联网承载网这一前沿概念。卫星互联网承载网是连接卫星与地面终端，实现数据高效传输与交互的关键网络架构，如同信息高速公路一般，确保卫星互联网中的各类信息能够快速、稳定地流通。具体而言，本章从国家战略需求、产业发展驱动、人民生活需求以及世界科技发展趋势入手，深入分析卫星互联网承载网在各领域的重要作用与发展契机。

1.1 国家重大战略需求

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，2024 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。

1.2 产业驱动经济升级

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。

1.3 人民服务需求

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。

1.4 世界科技引领

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”，IETF《天基网络切片标识符草案》成为 RFC9437 标准。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》。

二、卫星互联网承载网概述

卫星互联网承载网是构建全球空天地一体化通信系统的关键枢纽，其核心使命是贯通卫星星座、地面终端与地面核心网，实现跨地域、跨域的高速数据传输与灵活调度。在整个卫星互联网的体系中，卫星互联网接入网负责为用户提供“最后一公里”的接入服务，地面核心网承担业务治理与资源编排，而卫星互联网承载网则在二者之间形成一条覆盖全球的高速信息干线。这一承载体系以卫星星座为核心节点，依托星间链路和星地链路，将分布在轨道各处的卫星节点与地面信关站、高空平台等通信节点紧密连接，构成独立于地表的骨干通信网络。与地面互联网中的光纤骨干网类似，卫星互联网承载网直接决定了卫星互联网的通信能力上限，其性能优劣关系到系统能否真正实现全球覆盖、低时延和高可靠的服务目标。

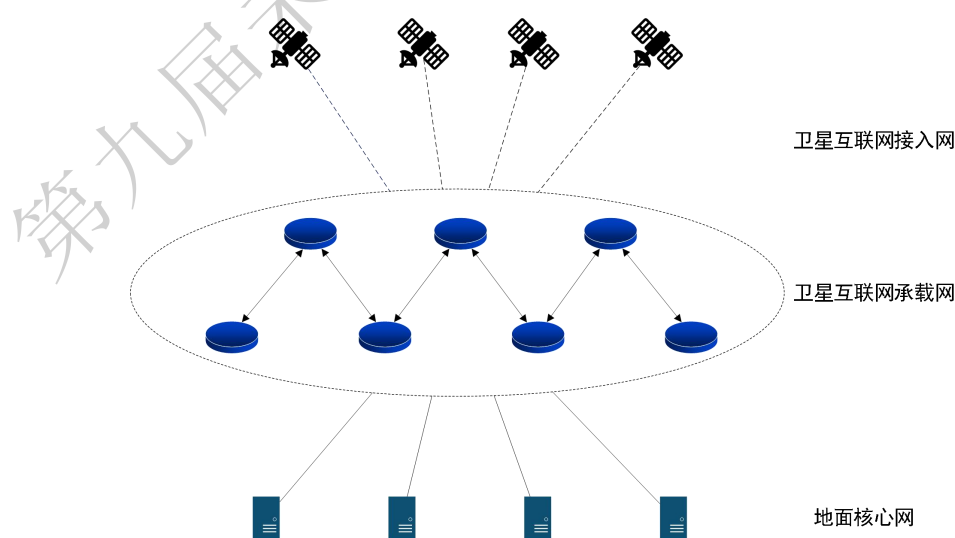


图 2-1 卫星互联网架构图

卫星互联网承载网的结构由在轨卫星、地面节点和多类型链路共同构成。在轨卫星既包括低轨卫星，也包括中高轨道的区域中继节点，它们通过高速星间链路形成一个动态的网状拓扑。这些卫星节点不仅仅承担信号转发的作用，还具备一定的路由计算、缓存和处理能力，使得网络在链路变化频繁的空间环境中依然能够保持高效的数据调度。地面节点主要由信关站和核心骨干节点组成，前者承担卫星与地面网络之间的数据注入与卸载，完成物理层和链路层的对接，后者则与地面核心网紧密结合，实现跨域业务的统一编排与管理。链路方面，星间链路主要采用高速激光通信或高频微波实现，具有大带宽、长距离、低误码率的特性，是卫星互联网承载网的骨干通道；星地链路则负责连接卫星与地面站，支持多频段传输以适应不同业务需求；同时，承载网还需与地面光纤网或无线骨干网形成互联接口，实现跨域无缝对接。由于卫星在轨运行形成高度动态化的拓扑结构，卫星互联网承载网的控制平面必须具备快速的拓扑感知与预测能力，通过基于轨道力学的链路预测实现路由的提前优化配置，并借助分布式控制与跨域编排机制，在多域多业务并行运行的情况下保持网络稳定。

在能力特征方面，卫星互联网承载网的首要优势是全球覆盖。依托大规模卫星星座的轨道布局，它可以为地面基础设施难以覆盖的海洋、极地、沙漠等区域提供稳定的骨干通信服务，真正实现全域无缝连接。其次是高速传输能力，现代星间激光链路单通道容量已可达数十 Gbps，未来有望迈向 Tbps 级别，结合多链路聚合与智能路由，可为全球范围的海量业务提供骨干传输支持。在时延方面，低轨星座单

跳传输延迟仅为数毫秒，跨洲通信延迟甚至可优于部分跨洋光缆路径，满足对低时延敏感的应用需求。与此同时，卫星互联网承载网具备高度的动态路由与自适应调度能力，能够应对卫星轨道变化、链路中断、业务突发等复杂情况，保障业务连续性。此外，星座规模和节点分布的高度冗余赋予了网络极强的抗毁性和弹性，在单点故障或区域性灾害中仍能维持通信链路畅通，这对于应急通信、国防安全等领域具有战略意义。

从网络协同的角度看，卫星互联网承载网与卫星互联网接入网之间是骨干与接入的关系，接入网完成用户与卫星之间的直接通信，承载网则负责将这些接入流量在全球范围内进行传递与交换。与地面核心网的关系则更加紧密，核心网不仅提供业务控制与资源调度的逻辑支撑，还与卫星互联网承载网形成控制信令与业务流量的双向交互，共同完成端到端业务的传输与管理。在与地面承载网的关系中，卫星互联网承载网起到互补与增强的作用，在地面光缆发达地区可以作为低时延的跨洲通道或高可靠冗余链路，在偏远或基础设施受限的地区则可独立承担骨干通信任务。此外，在空天地融合的网络架构中，卫星互联网承载网还可与高空平台网络、无人机中继网络协同工作，构建多层次立体化的通信体系。

未来，卫星互联网承载网的发展趋势将朝着更高速率、更低时延、更智能化以及更开放的方向演进。在高速率方面，将通过更高频段的微波通信和光通信技术，结合新一代高速调制编码和自适应链路控制，实现 Tbps 级骨干通道；在低时延方面，将优化轨道布局和跨域路由

算法，以满足 6G 及其后续网络对超低时延通信的需求；在智能化方面，将引入人工智能和机器学习技术，用于链路状态预测、路由动态优化和资源自适应分配，推动网络具备更高的自治能力；在开放性方面，承载网将逐步实现与地面互联网标准的深度融合，支持多运营商、多服务平台的接入与共享。然而，这一发展过程中仍面临诸多挑战，包括高动态性拓扑带来的路由与资源管理复杂性、跨域互操作的标准化问题、空间环境对通信链路的干扰与衰减，以及信息安全和抗干扰能力的持续提升等。这些问题的解决不仅需要通信、航天、信息安全等多个领域的协同创新，也需要在国际范围内形成技术标准与合作机制。

总体而言，卫星互联网承载网作为空天地一体化通信体系的战略中枢，是全球通信基础设施的重要组成部分。它不仅将突破地面网络的物理和地域限制，为全球用户提供高速、稳定、低时延的通信服务，还将在应急救援、海洋开发、极地科考、空中交通管理、全球物联网等领域发挥不可替代的作用。随着卫星通信技术、星座部署规模和智能化水平的持续提升，卫星互联网承载网将在未来全球信息基础设施体系中占据越来越核心的位置，成为真正意义上的“太空信息高速公路”。

三、卫星互联网承载网体系架构

卫星互联网承载网作为支撑空天信息传输与交互的核心基础设施，其体系架构的设计直接关系到网络的传输效率、可靠性、扩展性以及应对复杂任务的适应性。随着航天技术与通信技术的深度融合，卫星互联网承载网的体系架构不断演进，目前主要形成了集中式、分布式和混合式三种典型模式。本章将详细阐述卫星互联网承载网的集中式、分布式和混合式三种体系架构。

3.1 集中式架构

集中式架构基于软件定义网络（Software Defined Network, SDN）理念构建，如图 3-1 所示。在这种架构下，卫星互联网承载网中的卫星互联网路由器统一接收地面网络控制器上注的流表/转发表，并依据这些表项进行数据转发。所有的路由计算工作均在地面控制器完成，卫星互联网路由器本身无需具备路由计算功能。

集中式架构的主要优势在于简化了星上处理过程。由于复杂的路由计算任务由地面强大的计算资源承担，星上设备只需专注于按照既定规则进行数据转发，这降低了星上设备的复杂度和成本，同时也便于对网络进行统一管理和控制。例如，通过地面网络控制器，能够方便地对整个卫星互联网承载网的路由策略进行调整和优化，以适应不同的业务需求和网络状况。

然而，集中式架构也存在明显的缺点。由于所有的路由计算均依赖于地面中心，一旦地面控制器出现异常故障，整个卫星互联网承载网的路由功能将受到严重影响，甚至可能导致网络瘫痪。而且，在面对一些实时性要求较高的业务场景时，地面控制器计算路由并将转发表上注到卫星互联网路由器的过程可能会产生较大的时延，无法及时响应用户需求。例如，在突发的军事通信场景中，对网络的快速响应能力要求极高，集中式架构可能难以满足这种实时性需求。

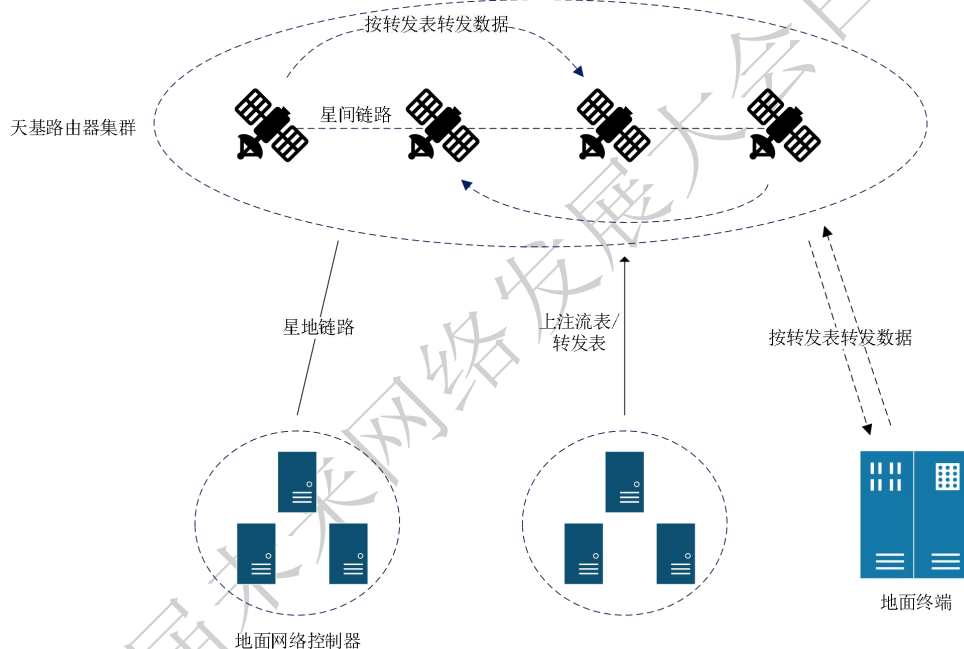


图 3-1 卫星互联网承载网集中式架构图

为了应对这些问题，研究人员进行了相关研究。例如，采用基于拓扑快照的静态路由方法。网络控制器根据星座拓扑变化规律，将一个周期内的星座拓扑划分为一系列快照序列。在任何一个快照内，可以认为拓扑保持不变，从而计算相应的转发表。当星座要从一个快照切换到下一个快照时，需要快速切换成为下一代快照对应的转发表。这种方法在一定程度上提高了路由的稳定性和适应性，但仍然无法完

全解决依赖地面控制器的问题。此外，为了进一步提升路由算法的负载均衡、运行效率、故障容错以及差异化服务保障能力，部分研究引入了网络状态感知机制以及深度强化学习等人工智能方法，进一步优化路由策略。通过实时感知网络状态，并利用人工智能算法进行智能决策，提高了集中式架构下卫星互联网承载网的性能。

3.1 分布式架构

分布式架构与集中式架构截然不同。在分布式路由方案中，卫星互联网承载网中的每一个卫星互联网路由器都必须动态地自主维护网络全局拓扑结构，并独立进行路由计算和决策，如图 3-2 所示。

分布式架构的最大优势在于其具有较强的自主性和鲁棒性。由于每个路由器都能自主决策，即使部分路由器出现故障或网络局部出现异常，其他路由器仍然能够根据自身维护的拓扑信息继续进行路由转发，保障网络的基本通信功能。例如，在受到空间碎片撞击导致部分卫星节点故障的情况下，分布式架构的卫星互联网承载网能够通过其他正常节点的自主调整，维持网络的连通性，确保关键业务的通信不中断。而且，分布式架构能够更好地适应卫星互联网承载网拓扑动态时变、链路频繁切换的特点。每个路由器能够实时根据本地的链路状态和邻居节点信息，快速调整路由策略，从而实现更高效的路由转发。

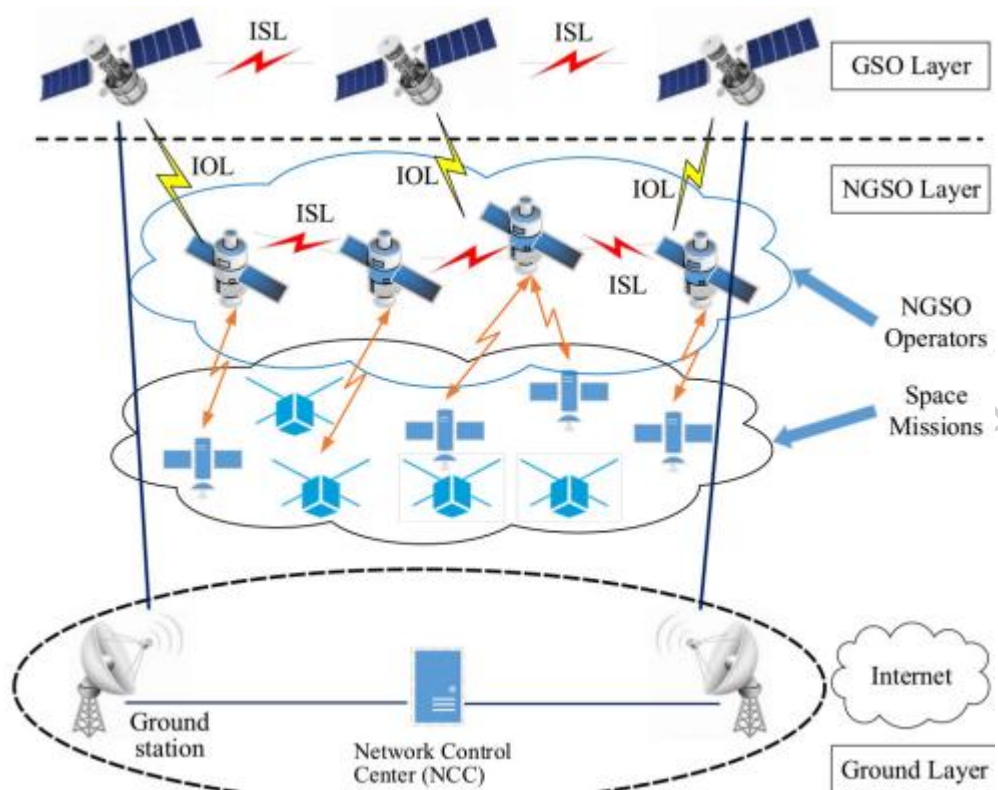


图 3-2 卫星互联网承载网分布式架构图

然而，分布式架构也面临一些挑战。一方面，每个卫星互联网路由器都需要具备强大的计算能力和存储能力，以维护复杂的网络全局拓扑信息并进行实时路由计算，这对星上设备的硬件资源提出了很高的要求。在卫星资源受限的情况下，实现这样强大的星上处理能力存在一定的困难。另一方面，由于每个路由器都独立进行路由决策，可能会导致网络中出现路由冲突和不一致的情况，影响网络的整体性能。例如，不同路由器对网络拓扑的理解可能存在偏差，从而导致数据包在网络中出现循环转发等问题。

从产业落地角度看，分布式架构的标准化与兼容性难题显著增加了工程化难度。不同卫星制造商的载荷硬件、操作系统及通信协议存

在差异，而分布式协同依赖统一的交互接口与算法逻辑，若缺乏跨厂商的标准规范，极易出现“信息孤岛”。例如，某星座的卫星采用自主研发的邻居发现协议，将无法与采用国际通用协议的其他星座节点建立有效协同，限制了卫星互联网承载网的跨系统互联能力。这种标准化滞后问题，不仅推高了组网成本，更制约了分布式架构在全球一体化卫星互联网网络中的规模化应用。

3.3 混合式架构

混合式架构结合了集中式和分布式架构的优点，试图在两者之间找到一个平衡。在混合式架构中，一部分路由决策由地面网络控制器集中进行，另一部分则由卫星互联网路由器分布式自主完成，如图 3-3 所示。

通常情况下，对于一些全局性、稳定性要求较高的路由策略，如网络的骨干路由规划等，由地面网络控制器根据对全网拓扑和业务需求的综合分析来制定，并将相应的路由表项下发给卫星互联网路由器。而对于一些局部性、实时性要求较高的路由调整，如应对局部链路故障或突发业务流量变化等情况，则由相关的卫星互联网路由器自主进行决策和处理。

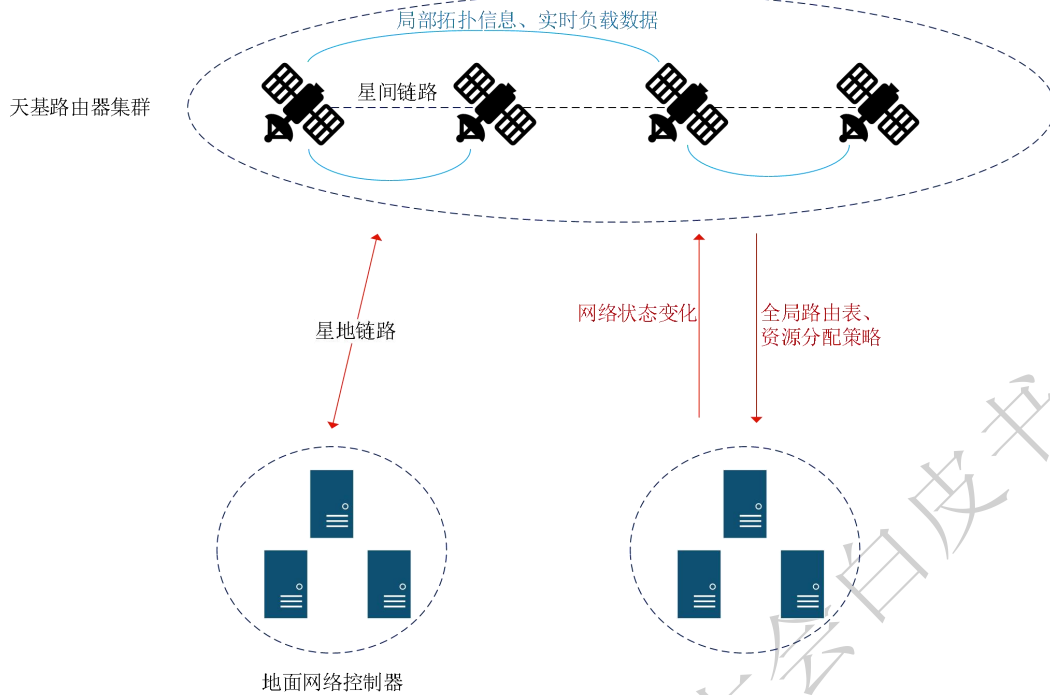


图 3-3 卫星互联网承载网混合式架构图

混合式架构的优势显而易见。它既利用了集中式架构便于统一管理和全局优化的特点，又发挥了分布式架构自主性强、响应迅速的优势。通过合理划分集中式和分布式路由的职责范围，能够在保障网络整体稳定性和可控性的同时，提高网络对局部变化的适应能力和实时响应能力。例如，在正常网络运行状态下，地面网络控制器可以根据长期的业务流量统计和预测，为网络规划出最优的骨干路由，确保网络资源的高效利用。而当某个区域突然出现大量业务请求或链路出现故障时，该区域的卫星互联网路由器能够立即自主调整路由，将流量快速疏导到其他可用路径，避免业务中断，同时及时将网络状态变化反馈给地面网络控制器，以便其对全局路由策略进行进一步优化。

然而，混合式架构的设计和实现较为复杂。如何合理地划分集中式和分布式路由的边界，以及如何确保两者之间的协同工作顺畅，是

混合式架构面临的关键问题。如果划分不合理，可能会导致集中式和分布式部分的优势无法充分发挥，甚至出现两者相互干扰的情况。例如，如果将过多的路由决策下放给卫星互联网路由器，可能会使网络失去全局的一致性和可控性。而如果过于依赖地面网络控制器，又会降低网络对局部变化的响应速度。为了解决这些问题，需要深入研究网络拓扑、业务流量特征以及星地通信链路特性等因素，建立合理的数学模型，通过优化算法来确定最优的集中式和分布式路由协同策略。同时，还需要设计高效的信息交互机制，确保地面网络控制器和卫星互联网路由器之间能够及时、准确地传递网络状态信息和路由决策指令。

综上所述，集中式、分布式和混合式架构各有优劣，在实际的卫星互联网承载网建设中，需要根据具体的应用需求、网络规模、卫星资源以及成本等多方面因素综合考虑，选择最适合的体系架构。随着技术的不断发展和应用需求的日益多样化，未来卫星互联网承载网的体系架构可能会朝着更加灵活、智能、融合的方向发展，以更好地满足全球通信、军事应用、科学研究等领域对卫星互联网网络的高性能要求。

四、卫星互联网承载网关键技术

卫星互联网承载网作为卫星通信网络的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到整个卫星通信系统的效能。为了实现高效、可靠、灵活的卫星互联网承载网，需要一系列关键技术的支持。本章将详细介绍星间/星地链路技术、路由技术、交换技术、移动切换技术、网络管理与控制技术、网络测量技术以及仿真与验证技术等卫星互联网承载网的关键技术。

4.1 星间/星地链路技术

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。

4.1.1 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。

然而，激光技术在星间/星地链路应用中也面临一些挑战。一方面，激光通信对卫星之间的捕获、对准和跟踪（Acquisition, Pointing and Tracking, APT）精度要求极高。由于卫星处于高速运动状态，且激光束的发散角极小，微小的角度偏差都可能导致通信中断。因此，需要开发高精度的 APT 系统，能够实时精确地调整卫星的指向，确保激光束始终对准目标卫星。这涉及到精密的光学测量技术、高精度的卫星姿态控制技术以及快速的信号处理技术等多个领域的协同发展。另一方面，大气对激光信号的衰减和散射作用较为明显，特别是在星地链路中，激光信号需要穿越大气层，天气条件如云雾、沙尘等会严重影响激光信号的传输质量。为了克服这一问题，研究人员提出了多种解决方案。例如，采用自适应光学技术，通过实时监测大气扰动对激光波前的影响，并利用变形镜等光学元件对激光波前进行校正，以补偿大气引起的信号畸变。此外，还可以通过优化激光通信的波长选择，尽量避开大气吸收和散射较强的波段，提高激光信号在大气中的传输性能。

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 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。

4.1.2 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。

频段特性决定微波链路的应用定位：L/S 波段（1-4GHz）穿透性强，雨衰影响小，适用于全球覆盖的移动通信（如铱星、Globalstar 系统），但带宽有限（单波束通常低于 10Mbps），主要服务于语音与低速率数据业务；Ku 波段（12-18GHz）在覆盖范围与带宽间取得平衡，广泛用于广播电视与宽带接入（如 OneWeb 的 Ku 波段用户链路提供 50Mbps 终端速率），雨衰中等（典型值 10-20dB），可通过功率控制补偿。Ka 波段（26-40GHz）带宽资源丰富（单波束可达 1GHz），是高通量卫星的核心频段（如 Starlink 的 Ka 波段用户链路支持 1Gbps 速率），但雨衰严重（暴雨时可达 40dB），需结合波束成形与自适应编码调制提升可靠性。毫米波频段（如 50.2-52.4GHz）正被探索用于馈线链路，Telesat、Boeing 等企业的星座计划通过该频段实现卫星与地面站的超高速回传，潜在速率可达 100Gbps，但需解决大气吸收（氧分子在 60GHz 附近有强吸收峰）与设备功耗问题。如图 4-1 所示，当前商业星座广泛使用 L/S 波段(Iridium、Globalstar)、Ku/Ka 波段(OneWeb、Starlink)，并正在探索 50.2-52.4GHz 毫米波频段。

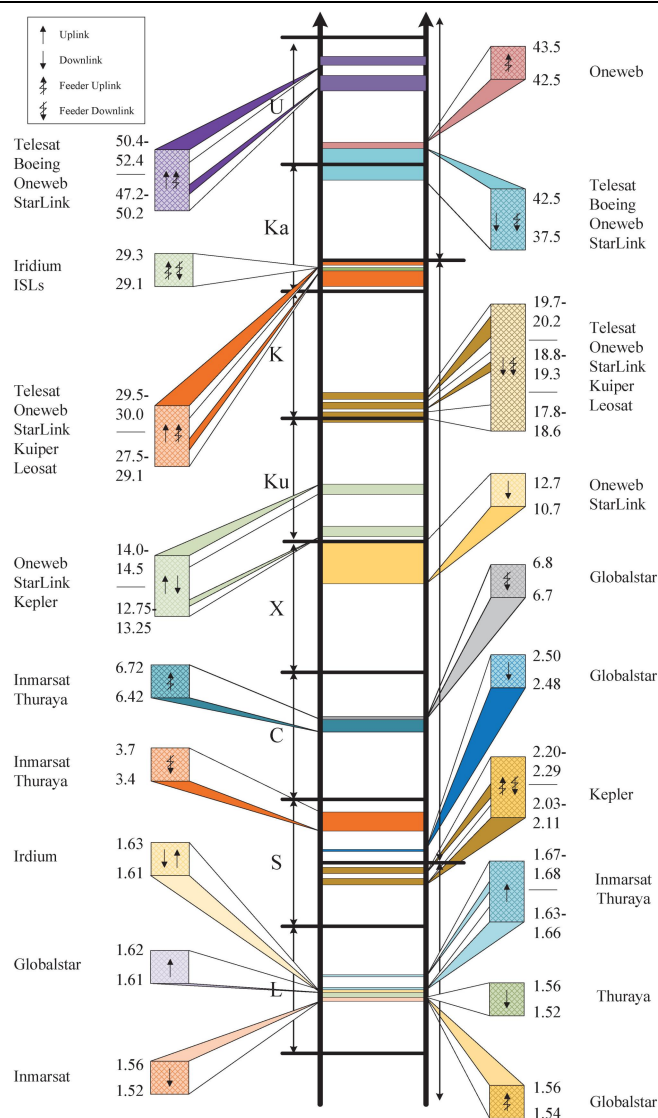


图 4-1 商业星座的频率使用分布

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网络构建中，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。

在卫星互联网承载网中，星间微波链路可采用高频波段（如Ka波段、毫米波频段），而星地微波链路对高频波段的使用存在显著限制，核心差异源于传输环境与链路特性的不同。

从星间链路来看，其处于太空真空环境，几乎无大气衰减、雨衰等干扰因素，高频波段的优势可充分发挥。高频波段（如Ka波段单波束带宽可达1GHz，毫米波频段潜在速率可达100Gbps）具备丰富的频谱资源，能支撑星间大容量数据传输，满足激光链路之外的高速

率需求。例如，低轨卫星星座的星间链路可通过 Ka 波段或毫米波实现星间高速协同，无需考虑大气吸收等问题，因此成为星间微波通信的优选。

而星地链路需穿越大气层，高频波段面临严重的环境干扰。根据白皮书内容，Ka 波段在星地传输中雨衰严重（暴雨时可达 40dB），毫米波频段（如 50.2-52.4GHz）还存在氧分子在 60GHz 附近的强吸收峰，导致信号衰减剧烈。此外，大气湍流、云雾等也会加剧高频信号的散射与损耗，严重影响通信可靠性。因此，星地微波链路更倾向于选择 L/S 波段（抗干扰、雨衰小）或 Ku 波段（平衡覆盖与带宽），高频波段仅在特定场景（如需超高速回传且可接受复杂补偿技术时）有限应用，且需搭配波束成形、自适应编码调制等技术抵消环境影响。

综上，星间真空环境消除了高频波段的传输障碍，使其能依托大带宽优势提升星间协同效率。而星地链路的大气衰减特性，决定了高频波段难以成为星地微波通信的主流选择。

4.2 路由技术

路由技术是解决卫星互联网承载网中数据如何在不同节点之间高效转发的关键技术。由于卫星互联网承载网具有拓扑动态时变、链路频繁切换等特点，传统的地面网络路由技术无法直接应用，需要专门针对卫星互联网网络的特性设计路由算法。

按照路由控制方式，卫星互联网承载网的路由技术通常可分为集中式路由、分布式路由以及集中式与分布式相结合的混合式路由。

集中式路由基于 SDN 理念，其核心逻辑是将路由计算与数据转发相分离。在这种模式下，卫星互联网路由器仅承担数据转发功能，统一接收地面网络控制器上注的流表/转发表，而路由计算、路径规划、资源分配等核心决策均在地面控制器完成。地面控制器通过全局感知卫星星座的轨道参数、链路状态、业务需求等信息，运用复杂的优化算法生成最优路由策略，并将其转化为流表 / 转发表定期或实时上注至卫星互联网路由器。这种方式显著简化了星上处理载荷的设计复杂度，降低了对卫星平台的功耗、算力和存储资源要求，尤其适合早期小容量卫星星座或对成本敏感的任务场景。然而，集中式路由对地面中心的依赖性极强，当地面控制器与卫星互联网路由器之间的通信链路出现延迟、中断或干扰时，路由策略的更新将受阻，导致网络无法及时响应突发故障（如卫星节点失效、链路质量骤降）或动态业务需求（如紧急通信任务的带宽扩容）。此外，随着卫星数量增多和业务量增长，地面控制器的计算压力会急剧增大，可能引发路由更新延迟，影响网络的实时性。

分布式路由中，每个卫星互联网路由器均具备完整的路由计算与决策能力，通过实时与周边节点交换链路状态信息（如带宽、时延、误码率等），动态自主维护网络全局拓扑视图，并基于预设的路由算法（如改进的 OSPF、RIP 或自定义协议）独立完成路由计算。这种模式下，卫星互联网路由器无需依赖地面干预，能够快速响应局部网络变化，例如当某条星际链路突然中断时，相邻卫星可立即重新计算替代路径，确保业务不中断，展现出极强的自主性和抗毁性。但分布

式路由对星上设备的硬件性能提出了严苛要求，需要卫星互联网路由器配备高性能处理器、大容量存储器和高通的通信接口，以支撑实时拓扑维护和复杂路由算法的运行，这无疑增加了卫星的载荷重量、功耗和成本。同时，由于各节点仅基于局部信息进行决策，可能出现路由冲突问题——例如不同卫星对同一业务流计算出的路径存在交叉干扰，或对网络拓扑的理解存在偏差导致数据包循环转发，进而影响网络的整体传输效率和稳定性。

混合式路由则巧妙结合了集中式与分布式路由的优点，通过分层或分域的方式实现路由控制的合理分配。具体而言，对于覆盖范围广、业务周期长、对路径优化要求高的骨干路由（如洲际卫星通信链路），由地面控制器进行集中决策，利用全局信息规划最优路径并动态调整资源分配；而对于局部区域内的突发业务、短周期通信或故障恢复路由（如单颗卫星覆盖范围内的用户终端接入），则由卫星互联网路由器自主处理，通过实时感知周边节点状态快速生成局部路由。这种模式既保留了集中式路由在全局优化和资源管控方面的优势，确保核心业务的稳定性和高效性，又发挥了分布式路由在实时响应和局部协同方面的特长，提升了网络对动态业务和突发故障的适应能力。例如，当地面控制器规划的骨干路由因突发干扰中断时，沿线卫星互联网路由器可立即自主协商生成临时替代路径，维持业务的连续性，待地面控制器重新计算并上注新的骨干路由后，再平滑切换回优化路径。通过这种“全局管控+局部自主”的协同机制，混合式路由能够在网络的可控性、实时性和抗毁性之间取得精准平衡，成为大规模卫星互联

网承载网的主流路由技术选择。

为了提高卫星互联网承载网路由算法的性能，研究人员还引入了多种优化策略。例如，网络状态感知机制能够使路由算法实时获取网络的拓扑结构、链路状态、流量负载等信息，从而根据网络的实际情况动态调整路由策略。在网络拓扑发生变化或出现链路故障时，能够及时发现并重新计算最优路由，避免数据包的丢失和网络拥塞。深度强化学习等人工智能方法也被应用于路由算法中。通过构建强化学习模型，让路由算法能够在不断与网络环境交互的过程中学习到最优的路由策略。例如，将网络的吞吐量、时延、丢包率等性能指标作为奖励函数，让路由算法通过不断尝试不同的路由决策，以最大化奖励为目标，逐步学习到适应不同网络场景的最优路由策略。这种基于人工智能的路由算法能够更好地应对卫星互联网承载网复杂多变的特性，提高网络的整体性能。

此外，针对卫星互联网承载网中不同业务对网络性能的不同要求，还需要设计支持差异化服务的路由算法。例如，对于实时性要求极高的语音通信和视频会议业务，路由算法应优先选择时延小、抖动低的路径进行数据转发，以保证通信的流畅性和质量。而对于一些对数据完整性要求较高的文件传输业务，则应选择可靠性高、丢包率低的路由路径。通过对不同业务进行分类，并为每类业务制定相应的路由策略，能够更好地满足多样化的业务需求，提高卫星互联网承载网的服务质量。

4.3 交换技术

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。

4.4 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。

4.5 网络管理与控制技术

卫星互联网承载网的管理与控制技术旨在实现异构资源的高效协同和网络状态的精准调控，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。利用数字孪生技术，根据采集到的实时数据，在虚拟环境中构建与真实卫星互联网承载网完全一致的网络虚拟映像。这个虚拟映像能够实时反映真实网络的运行状态。在进行网络升级、新业务部署等操作之前，可在虚拟映像中进行事前仿真，模拟不同操作对网络性能的影响，通过对仿真结果的分析，提前优化决策，避免在真实网络中实施时出现问题，保障网络的稳定运行。
 - 故障管理：结合区块链的去中心化信任机制和入侵检测系统，实现故障的自主检测与修复。区块链技术具有去中心化、不可篡改、可追溯等特点，将其应用于卫星互联网承载网的故障管理中，可建立一个去中心化的故障信息记录和共享系统。每个节点都参与到故障信息的记录和验证中，确保故障信息的真实性和可靠性。
- 入侵检测系统（Intrusion Detection System, IDS）实时监测网络流量，识别异常流量和攻击行为。当检测到故障或入侵时，系统能够自动触发故障诊断流程。利用区块链上记录的历史故障信息和解决方案，结合实时监测数据，实现故障的自主检测与修复。例如，当某颗卫星的通信链路出现异常时，IDS 首先发现异常流量，然后通过区块链上的信息，快速判断故障类型和可能的原因，自

动采取相应的修复措施，如切换备用链路、调整通信参数等。

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。

强化学习算法则通过不断地在网络环境中进行试错，以网络性能指标（如吞吐量、时延、资源利用率等）为奖励信号，自主学习和改进资源分配策略。在资源分配过程中，强化学习算法尝试不同的资源分配方案，根据得到的奖励信号判断方案的优劣，逐渐找到最优的资源分配策略。未来趋势包括 AI 驱动的自主管理、意图驱动网络管理，以及 3GPP 5G 管理框架、ETSI MEC 管理接口等标准化体系的深度融合，推动卫星互联网网络向智能化、自动化演进。

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。

4.6 网络测量技术

网络测量作为卫星互联网承载网运维的核心环节，是实现网络性能评估、故障诊断和优化决策的基础。由于卫星互联网网络处于特殊的空间环境，面临着非平稳信道、长延迟、断续连接等诸多挑战，传统地面网络的测量方法难以直接适用，必须针对其特性进行专门设计。

从测量内容来看，卫星互联网网络的测量涉及多个层面，且每个层面都有其独特的技术要点：

- **链路级测量：**主要针对物理层的关键参数，包括误码率、载噪比、多普勒频偏和信道状态信息等。在轨测试（In Orbit Testing, IOT）系统是实现链路级测量的重要手段，它通过专用测试信号来测量高功率放大器非线性、相位噪声等关键参数。不过，传统的 IOT 方法需要中断业务传输，在一定程度上影响了网络的正常运行。为解决这一问题，新型认知测量技术应运而生，它利用扩频信号实现非侵入式测量，能够在不影响正常业务的情况下完成参数采集。例如，通过在业务信号中嵌入特定的扩频探测序列，接收端可以通过信号处理技术分离出探测序列，从而实时监测链路的误码率、载噪比等参数，既保证了测量的连续性，又不干扰正常通信。
- **网络级测量：**着重关注端到端的性能指标，如端到端时延、吞吐量、丢包率和路由收敛时间等。不同轨道的卫星，其端到端时延存在显著差异，GEO 卫星的单向传播延迟约 240ms，而 LEO 卫星

仅 4-20ms。SERENADE 测试平台是网络级测量的典型工具，它支持多维度的性能评估，能够全面反映网络的运行状态。在卫星互联网网络中，由于卫星的高速运动和复杂的空间环境，链路经常出现断续连接的情况，针对这种场景，专门设计的测量协议发挥着重要作用。这些协议采用存储-携带-转发的机制，能够适应链路的断续性，准确评估服务质量（Quality of Service, QoS）。例如，在延迟容忍网络中，测量协议会根据链路的连接状态，动态调整测量数据的发送和存储策略，确保即使在链路中断的情况下，也能收集到有效的测量数据。

- 安全测量：聚焦于攻击检测、异常流量分析和系统脆弱性评估，为网络安全防护提供量化依据。随着卫星互联网网络在军事、通信等关键领域的广泛应用，其安全问题日益凸显。安全测量通过对网络流量的实时监测和分析，能够及时发现恶意干扰、未授权接入等攻击行为。同时，通过对系统脆弱性的评估，能够找出网络系统中存在的安全漏洞和薄弱环节，为网络安全策略的制定提供支持。区块链技术的引入进一步提升了安全测量的可靠性，其去中心化的信任机制和不可篡改的特性，确保了测量数据的真实性和完整性，为安全审计和追溯提供了可信的依据。

在技术创新方面，卫星互联网网络测量技术呈现出以下几个重要的发展方向：

- 基于机器学习的信道状态预测：非平稳信道是卫星互联网网络面临的主要挑战之一，传统的测量方法难以实时准确地反映信道的

变化。基于机器学习的信道状态预测算法，通过对历史测量数据的学习和分析，建立信道状态的预测模型，能够提前预判链路质量的变化。这为路由调整、资源分配等网络优化操作提供了前瞻性的支持，有助于提高网络的性能和可靠性。

- 分布式测量架构结合边缘计算：卫星互联网网络覆盖范围广，节点分布分散，集中式的测量架构往往会导致测量数据的传输延迟大、开销高。分布式测量架构结合边缘计算技术，将测量任务分布到卫星、地面网关等边缘节点，在边缘节点处就近处理测量数据，仅将关键的测量结果上传至控制中心。这种方式不仅减少了测量数据的传输量，降低了网络开销，还实现了测量数据的近实时处理，提高了网络测量的效率和响应速度。例如，在物联网网关处，通过边缘计算技术对本地的流量特征进行分析和处理，及时发现异常流量，并将处理结果上报给控制中心，以便快速采取应对措施。
- 主动探测与被动监测相结合的综合方法：主动探测通过发送专门的探测包来获取网络信息，能够准确测量网络的某些性能指标，但会消耗一定的网络资源；被动监测通过分析业务流量来获取网络信息，不占用额外的网络资源，但测量的准确性可能受到业务流量特性的影响。主动探测与被动监测相结合的综合方法，能够平衡测量精度与资源开销。例如，对于时延敏感业务，采用主动探测的方式，以确保测量结果的准确性；对于普通数据业务，则通过被动监测的方式统计丢包率等指标，以减少网络资源的消耗。

测量数据的价值不仅体现在实时监控上，更重要的是为网络优化提供支持。通过对大量测量数据的大数据分析，能够构建网络性能预测模型，实现对网络拥塞等问题的预警，并提前进行资源预分配。同时，异常检测算法能够快速识别网络中的异常情况，为故障定位和排除提供量化依据，推动卫星互联网网络从“被动运维”向“主动管理”转型。

4.7 仿真与验证技术

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。

五、卫星互联网应用场景

卫星互联网作为新兴的通信技术，正逐渐融入各个领域，为人们的生活和工作带来了诸多便利。本章将给出卫星互联网在不同领域的应用场景，包括通信增强类、应急保障类、产业赋能类和科学研究类等，展示其在提升通信能力、保障应急救援、推动产业升级和支持科学探索等方面的重要作用。

5.1 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。

5.1.1 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。我国规划的三个万颗级星座正在稳步推进，其中星网集团的“GW 星座”已完成 4 组 40 颗低轨卫星部署，垣信的“千帆星座”完成 5 组 90 颗卫星发射，计划分三期推进，2030 年底将实现 1.5 万颗卫星部署。

5.1.2 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。

5.1.3 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 5-1 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。

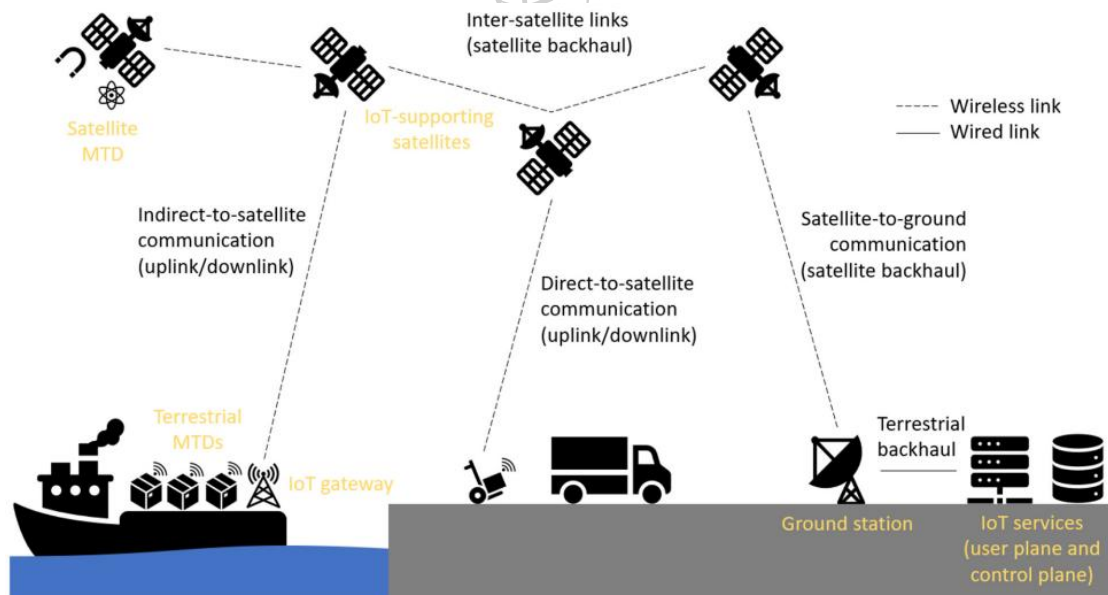


图 5-1 远洋船舶全域联网架构

5.1.4 手机直连卫星通信

2023 年起，基于 3GPP R17 NTN 协议的 5G 技术成功上星验证推动了手机直连卫星技术商业化。该技术利用高轨卫星大波束覆盖与低轨卫星高容量优势，使普通智能手机无需外设即可实现卫星通话、短报文及定位。中国电信联合华为、小米等厂商推出支持天通卫星电话功能的消费类手机终端，累计销量近 2000 万部，支持在珠峰大本营、塔克拉玛干沙漠等区域发送 10 秒内可达的应急短信。SpaceX 与 T-Mobile 合作的“Direct to Cell”服务则通过星上 LTE 射频转发器，实现 iPhone 用户的无感卫星接入，单星支持百万级用户并发。未来技术将向新旧终端兼容演进，一方面通过软件升级使存量 4G/5G 手机支持基础卫星通信，另一方面在新终端中集成新一代天线技术，提升天线增益并显著降低功耗。

5.2 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”。

5.2.1 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 5-2 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。

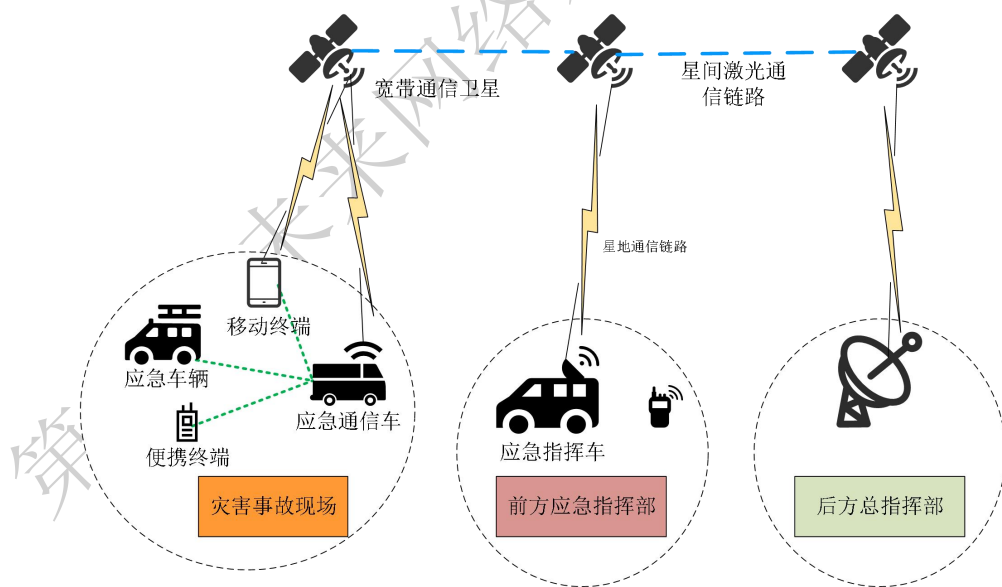


图 5-2 卫星互联网灾害应急通信响应图

5.2.2 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。

5.2.3 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。

5.3 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。

5.3.1 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。

5.3.2 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（如中国星网“鸿雁星座”）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。

5.3.3 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 5-3 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。

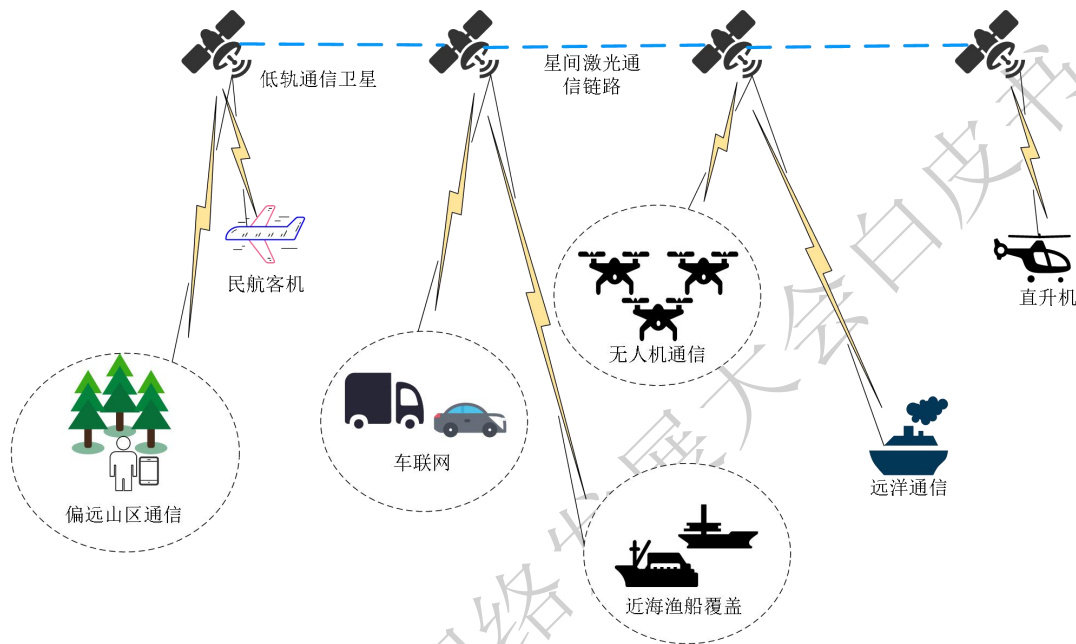


图 5-3 卫星互联网低空经济支撑图

5.3.4 数字乡村全域覆盖

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。

5.4 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。

5.4.1 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。

5.4.2 空间科学实验

卫星互联网承载网通过动态组网与星地直连技术，为在轨科学实

验提供了高可靠通信底座。欧洲航天局支持的 LIDE 任务于 2025 年 7 月 23 日发射首颗验证卫星，首次实现立方体卫星与地面小型 5G 终端的直接宽带互联。该卫星由意大利 Tyvak International 公司研制，搭载 K/Ka 波段转发器，通过低地球轨道直连非常小口径终端，开展吞吐量、时延及信噪比测试，旨在验证未改装民用设备（如手机）在偏远地区直连卫星的可行性，为未来全球 5G 非地面网络铺路。这一技术若规模化应用，可支持空间站实验数据实时回传、太空育种监测等场景，例如宇航员在舱外活动中直接通过轻量化终端传输高清实验影像，大幅提升在轨科研灵活性。此外，中国“天通一号”卫星系统为空间实验设备提供自主可控通信保障，例如搭载于 AORO P1100 三防平板的卫星模块，支持科考人员在无人区远程操控空间实验设备，并通过北斗短报文回传关键数据。这些创新推动空间科学从“单星孤岛式实验”迈向“多星协同智能科研”新范式。

5.4.3 全球气候监测

卫星互联网承载网通过高分辨率遥感星座与人工智能模型的融合，实现了对地球气候系统的全链条监测预警。欧洲气象卫星组织将于 2025 年 8 月 12 日发射 Metop-SGA1 卫星，这是新一代欧洲极轨气象卫星的首星，由空客防务与航天公司建造，携带包括 Copernicus Sentinel-5 大气监测载荷在内的 6 台先进仪器。该卫星运行于 800 公里太阳同步轨道，可获取全球温度、降雨、风场、气溶胶及火山活动的高精度数据，通过星上高速处理器与激光链路实现分钟级数据回传，

大幅提升极端天气预警能力。

第九届未来网络发展大会白皮书

六、卫星互联网承载网产业现状及趋势

卫星互联网承载网作为构建太空信息基础设施的核心组成部分，正随着全球航天技术的飞速发展和商业航天市场的持续升温，迎来前所未有的发展机遇与挑战。本章将系统梳理全球卫星互联网承载网领域的发展态势，聚焦国际及国内具有代表性的卫星互联网项目，包括 Starlink、OneWeb、Amazon Kuiper 等国际巨头主导的星座计划，以及我国的星网、垣信等重点项目。

6.1 Starlink 进展

作为全球低轨宽带卫星项目的标杆，美国“星链”（Starlink）项目展现出强大的执行力与创新能力。

截至 2025 年 7 月，Starlink 已发射超 9100 颗卫星，在轨正常业务状态的卫星超 7000 颗，其中 V2 卫星 3626 颗，V1 卫星 3402 颗，构建起规模空前的低轨卫星网络，为全球多地区提供高速互联网接入服务。

在用户终端方面，Starlink 已生产超 1000 万套用户终端设备，用户数量超 500 万，覆盖地面、海洋、低空及空间等多个领域。地面上，为偏远地区弥补网络覆盖不足的缺陷。海洋中，为远洋船只提供稳定通信服务。航空领域，为乘客带来优质机上互联体验；空间任务中，为飞船提供通信服务，美军也关注其在空间中继卫星计划中的应用潜

力。

手机直连卫星（Direct to Cell, DTC）业务是 Starlink 的重要发展方向。截至 2025 年 7 月，已部署 660 颗 V2MiniDTC 卫星，完成第一阶段星座建设，并与多个国家和地区的运营商合作推出服务，目前主要集中在短信和物联网领域，覆盖户外场景和偏远地区。虽存在网络覆盖非实时、有延迟及语音服务未推出等问题，但发展潜力巨大。

技术创新上，Starlink 每次发射 V2mini 卫星可新增 2.7Tbps 容量，利用先进相控阵天线和低轨道设计，具备更低延迟和更高速率，适合动态场景下的卫星移动通信。成本控制成效显著，ARPU 降至 45 美元/月，50GB 套餐外流量 1 美元/GB，资费逐渐与地面网络相当，市场竞争力大幅提升。

6.2 OneWeb 进展

欧洲“一网”（OneWeb）项目聚焦低轨卫星互联网建设，通过部署大规模低轨卫星星座，依托先进卫星制造工艺和终端技术，为全球用户提供广覆盖、低时延的互联网服务，并持续拓展在航空、汽车、偏远地区通信等多领域的应用场景。

OneWeb 成立于 2012 年，总部位于伦敦，截至 2024 年 12 月，其拥有全球第二大规模的卫星星座，在轨运行卫星 648 颗，仅次于 Starlink 星链。

OneWeb 业务范围广泛，涵盖全球通信、航空低时延宽带通信、汽车蜂窝网络服务、直接到家庭及公共机构的互联网服务、偏远农村

地区覆盖、核心网搭建等。技术上，星座链路切换方案避免干扰同频地球静止轨道卫星，成为多数低轨星座技术范例；空客公司为其设计的全新卫星总装集成测试工艺，超大规模卫星制造能力成航天技术典范；用户终端免操作、免维护，还研制了口袋式终端。

6.3 Amazon Kuiper 进展

作为美洲低轨卫星互联网领域的新玩家，亚马逊 Kuiper 项目采取后发制人的云原生星座策略。亚马逊在云计算领域的深厚技术积累与庞大用户基础，为该项目发展提供了独特优势。

卫星部署方面，截至 2024 年底，Kuiper 卫星数量约 300 颗，相对较少，但发展速度可观。其计划构建由数千颗卫星组成的巨型星座，以实现全球宽带覆盖，致力于为地面网络覆盖不足的偏远地区及发展中国家，提供高速、低延迟的互联网接入服务。

技术上，Kuiper 充分借助亚马逊在云计算、大数据和人工智能领域的技术优势。卫星采用先进通信技术与高效星间链路，实现数据快速传输处理；通过云原生架构，能与亚马逊云服务良好结合，为用户提供无缝云计算体验，例如方便用户快速访问云存储、云计算资源以高效处理数据和运行应用。

未来，随着技术成熟和星座规模扩大，Kuiper 有望在卫星互联网承载网市场占据重要地位。其云原生的独特优势可能吸引大量对云计算服务有需求的企业和个人用户，为天基互联网发展带来新活力与竞争格局。

6.4 星网进展

中国“GW+千帆”项目是国家统筹的自主卫星互联网承载网体系。近年来，中国在该领域投入大量资源，致力于构建具有自主知识产权、安全可靠的卫星互联网系统。

卫星星座规划方面，中国航天科技集团主导的GW星座计划稳步推进，采用高、中、低轨卫星混合组网，实现全球覆盖与多样化业务需求：高轨卫星提供大面积稳定覆盖，适用于广播、固定通信等；中轨卫星在保障一定覆盖范围的同时，实现较高数据传输速率；低轨卫星凭借低延迟特点，满足高清视频直播、在线游戏等实时交互类业务需求。“千帆”计划作为星网重要组成部分，侧重为特定区域或行业提供针对性服务，如通过构建专门低轨卫星子星座，为海洋渔业、海上运输等产业提供通信保障，实现船只与陆地指挥中心实时信息交互，提升海洋产业运营效率与安全性。

技术创新上，中国在星间链路、星上处理、卫星制造等关键领域成效显著。星间链路采用激光通信等先进技术，提高数据传输速率与可靠性，减少对地面基础设施的依赖；星上处理技术让卫星具备更强计算能力，可实时处理分析数据，如遥感卫星能快速筛选关键信息并及时下传；卫星制造不断提升集成度与可靠性，降低重量和功耗，延长使用寿命。

应用领域中，星网项目在国防安全、应急通信、远程教育、远程医疗等方面作用突出。国防安全领域，为军队提供可靠通信保障，确

保复杂环境下的指挥控制与信息传输；应急通信方面，在自然灾害导致地面网络瘫痪时，迅速提供服务保障救援；远程教育和远程医疗领域，助力偏远地区对接城市优质资源，促进资源公平分配。

未来，随着星网项目的完善与扩展，中国卫星互联网承载网将进一步提升全球竞争力，为国家经济发展、社会进步和国家安全提供坚实支撑，同时中国也将积极参与国际合作，与各国共同推动天基互联网技术的发展与应用。

6.5 垣信进展

中国“千帆星座”是由地方国资驱动卫星互联网商业补充，垣信卫星通信科技（海南）有限公司在其发展中发挥重要作用。

该星座主要聚焦商业应用领域，旨在为企业用户提供定制化卫星通信解决方案。卫星部署上，计划构建规模适中的低轨卫星星座，目前已发射部分试验卫星，用于验证关键技术和开展初步商业服务，为后续大规模部署奠定基础。

业务模式方面，与众多行业企业深度合作。能源行业，为石油、天然气等企业的海上钻井平台、偏远矿区提供通信服务，保障数据传输和指挥调度；交通运输行业，与物流企业合作，为长途运输车辆、集装箱船舶提供实时定位和通信服务，实现物流信息全程跟踪管理；物联网领域，助力构建全球物联网通信网络，为各类设备提供可靠连接，推动物联网产业发展。

技术创新上，注重引入先进通信技术和智能化管理系统。采用新

型调制解调技术，提高频谱效率和数据传输速率；利用人工智能算法对卫星网络智能管理优化，动态调整通信资源，提升网络整体性能。

未来，在地方国资支持下，“千帆星座”有望扩大星座规模、提升服务质量，在商业卫星通信市场占据一席之地，为中国卫星互联网承载网产业多元化发展贡献力量，并与其他项目协同合作，推动产业整体进步。

第九届未来网络发展大会白皮书

七、卫星互联网承载网标准化现状

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。

7.1 3GPP 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 将继续推进可再生链路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。

7.2 IETF 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。

draft-jones-tsvwg-transport-for-satellite 草案将优化视野从 TCP 拓展至 SCTP 和 QUIC，针对加密协议带来的新挑战，提出延长 ACK 周期、调整初始窗口、优化多流控制等措施。

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。

网络层协议与路由架构方面，2025 年初发布的 RFC 9717 提出可扩展星座路由架构，利用轨道预测机制实现动态链路通知，通过时间窗“路径时效性”与“分区划分”方法保持收敛稳定性，无需改动现

有 IGP 协议语义。该架构能减少星座网络中常规重路由事件，提高通信链路稳定性，且依托现网技术栈可实现快速部署，在技术创新、性能提升和实际应用方面意义重大。

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。

7.3 ITU 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；2023 年发布的 Recommendation ITU-R M.2160-0 构建 IMT-2030 系统整体框架，明确 NTN 为“无处不在智能连接”关键组成部分，定义六项能力需求，提出 NTN 与卫星星座等空中平台协同融入。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。在高频段与共频互通方面，M.2541 文档探索 IMT 在 100GHz 以上频段可能性，M.2370 与 M.2412 等报告提出共频干扰抑制策略，解决 NTN 与地面系统共存互操作问题。

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。

7.4 CCSA 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 的核心网关键技术研究，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。

此外，CCSA 还积极组织产学研用各方力量，针对卫星互联网承载网的路由技术、网络管理、频谱资源分配等关键领域开展技术研讨与标准预研工作。在路由技术标准制定上，充分考量集中式、分布式及混合式路由在卫星互联网环境下的适用性，力求制定出既能保障网络高效运行，又能适应卫星网络高动态、长时延等特性的路由标准体系。在网络管理方面，研究构建统一的星地融合网络管理架构标准，以提升网络资源的协同管理效率，增强网络的可控性与稳定性。而在频谱资源分配标准研究中，综合考虑卫星通信与地面通信的频谱复用需求，探索高效、合理的频谱分配机制，避免频谱干扰，提高频谱利用率。

总体而言，CCSA 通过一系列扎实有效的工作，已初步搭建起我国卫星互联网承载网标准化框架，在核心网、承载网以及关键技术标准制定上成果显著，为我国卫星互联网产业的有序发展、技术创新以及国际竞争力提升奠定了坚实基础，未来还将持续深入推进相关标准的细化与完善工作。

八、卫星互联网特殊问题剖析

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、安全风险的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。

8.1 轨道/频谱资源紧张导致承载网容量瓶颈

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。

8.2 空间环境复杂导致承载网链路可靠性下降

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。

宇宙射线是影响链路可靠性的重要因素，其高能粒子会对卫星电子设备产生辐射效应，引发单粒子翻转、锁定等故障，降低卫星信号处理能力，导致链路信号误码、中断，如击中处理器可能使卫星无法正常收发信号，造成链路中断。太阳活动的影响同样不容忽视，太阳风暴释放的高能带电粒子流和电磁辐射会与地球磁场、电离层相互作用，引起电离层扰动，导致卫星信号折射、散射、吸收，使信号强度衰减、延迟增加甚至中断，对高频段卫星链路影响更显著，可能导致完全中断。空间碎片也是重大威胁，大量空间碎片高速运行，与卫星碰撞会损坏通信天线、太阳能电池板等关键部件，导致卫星失效和链路中断，微小碎片也可能划伤设备影响信号质量，降低链路可靠性。

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。

8.3 卫星互联网安全风险の承载网级联效应

卫星互联网的安全风险具有特殊性和复杂性，一旦发生安全事件，很容易在承载网中产生级联效应，对整个卫星互联网的安全运行造成严重威胁。

网络边界模糊对承载网信任模型造成严重瓦解。卫星互联网覆盖广、涉及多国家地区，网络节点多且分散，通信链路复杂，使网络边界难以清晰界定。这导致承载网无法有效区分合法与非法用户，传统基于边界的信任模型失效，非法用户易突破边界进行攻击破坏，如伪装成合法节点窃取信息、篡改数据等。同时，安全策略难以有效实施，传统安全设备无法准确识别攻击来源和路径，节点的移动性和动态性也增加了安全策略制定和更新难度，降低了承载网安全防护能力。应对措施包括构建新的信任模型和安全机制，采用基于公钥基础设施的身份认证机制结合区块链技术；加强访问控制和权限管理，实施细粒

度策略及动态权限管理；引入零信任安全架构，对每个实体和访问请求严格验证，加密认证数据包并监测异常访问。

卫星系统漏洞易在承载网中横向渗透。卫星系统的漏洞可能存在于操作系统、应用软件、通信协议等方面，如操作系统的缓冲区溢出漏洞、通信协议缺乏有效认证加密机制等。由于承载网高度互联，攻击者攻破存在漏洞的卫星后，可利用通信链路向其他卫星或地面站发起攻击，实现横向渗透，如控制更多卫星节点发起大规模攻击。这会导致敏感信息被窃取、数据被篡改、承载网瘫痪等严重后果。应对措施包括加强卫星系统漏洞管理，建立发现、评估和修复机制，加强开发过程安全管理；在承载网部署入侵检测和防御系统，实时监测并阻止渗透；采用加密技术保护通信数据及控制指令；建立应急响应机制，制定预案并加强合作共享情报。

8.4 星地融合难题对承载网端到端 QoS 的挑战

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。

九、总结与展望

当前我国卫星互联网承载网仍面临轨道与频谱资源争夺加剧、空间环境适应性不足、星地融合异构性突出、安全防护体系待完善等挑战，迫切需要从“技术突破”向“体系引领”演进，构建自主可控、全域覆盖、智能高效的空天地一体化信息基础设施。作为连接天基与地面的“太空信息高速公路”，其不仅是国家战略竞争力的核心标志，更是支撑数字边疆防护、产业数字化转型、全球科技竞争的关键底座。

相比于早期单一链路的天基通信模式，我国已形成的“三架构、七技术”（集中式/分布式/混合式架构，星间链路、路由交换、移动管理等七大核心技术）承载网体系展现出显著优势：在技术层面，突破中轨星间激光通信、星上算力网络等核心技术，主导 3GPP 星地协同协议、IETF 天基网络切片标准。在应用层面，实现偏远地区 4G/5G 级服务、手机直连卫星商用、灾害应急通信存续等规模化落地。在产业层面，形成“国家统筹+市场协同”格局，星网“GW+千帆”项目与垣信“千帆星座”互补，推动卫星批量化生产与火箭回收技术突破。同时，国际合作深化、应用需求多元化、技术融合加速等为其高质量发展带来重大机遇。

因此，本白皮书系统梳理了卫星互联网承载网的需求愿景、应用场景、技术体系、产业现状及标准化进展，揭示其在国家重大战略、产业升级、民生服务及全球科技竞争中的关键价值，提出“三架构、

七技术”体系框架，并对未来发展方向进行前瞻性研判。

未来，我们将聚焦四大方向深化工作：一是推进核心技术突破，重点研发 1Tbps 级星间激光通信与量子加密融合技术、PB 级星上算力网络、AI 驱动的动态路由与数字孪生网络管理系统。二是完善标准体系，主导 3GPP 星地融合空口协议、IETF 分布式路由优化、ITU Ka/毫米波频段分配等关键标准制定。三是加速产业协同，推动卫星批量化生产降本、口袋式低功耗终端研发、“天基丝路”国际合作平台扩容。四是开展原型验证，依托国家级实验室推进星上智算载荷、手机直连卫星增强技术、应急通信一体化设备的测试与优化。

诚邀业界同行共同参与，携手推动卫星互联网承载网从“技术并跑”迈向“体系领跑”，为数字中国建设与人类命运共同体构建提供坚实的空天地一体化信息支撑。

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	APPM	Amplitude and Position Modulation

制		
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] 央视网. (2024). 国家航天局: 加快“一带一路”空间信息走廊建设. <https://tv.cctv.com/2017/05/13/VIDE9eIPLmCAj4yyFYADGN88170513.shtml>
- [2] 新华社. (2025). 太空新基建: 中国商业航天提速. <https://www.xinhuanet.com/tech/20250424/9dfb5ef214174fb69f1b182884550b78/c.html>
- [3] 徐珉. (2014). 面向 5G-Advanced 和 6G 的星基移动通信网络标准技术研究. 移动通信.
- [4] 赛迪顾问. (2020). 2020 新基建之中国卫星互联网产业发展研究白皮书. https://www.sgpjbg.com/baogao/65325.html?plan=N-22-qita&unit=41&tg=1&bd_vid=5695970933614155036&sdclkid=AL2615fpxOgpbso.
- [5] 中国电信卫星. (2025). 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”. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/1927117944653066897>.
- [6] Liberg O, Löwenmark S E, Euler S, et al. (2021). Narrowband Internet of Things for non-terrestrial networks. In IEEE Communications Standards Magazine.
- [7] Yue P, An J, Zhang J, et al. (2023). Low earth orbit satellite security and reliability: Issues, solutions, and the road ahead. In IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- [8] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, et al. (2020). Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. In IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- [9] Zhou D, Sheng M, Li J, et al. (2023). Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: A survey and future challenges. In IEEE Communications Surveys & Tutorials.

-
- [10] 工业和信息化部, 中央网信办, 教育部等. (2023). 算力基础设施高质量发展行动计划. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_fcb3aa793e674960b1c00d7e3b6ad448.html
- [11] 中国空间科学技术. (2022). 低轨巨型星座构型设计与控制研究进展与展望.
- [12] Salim S, Moustafa N, Reisslein M. (2024). Cybersecurity of satellite communications systems: A comprehensive survey of the space, ground, and links segments. In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- [13] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, Sharma SK, Shankar B, Montoya JF, Duncan JC, Spano D, Chatzinotas S, Kisseleff S, Querol J. (2020). Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges. In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- [14] Zhang, Y., Pan, T., Zheng, Y., Ruan, G., Li, H., Liu, Y., & Huang, T. (2025). Topology-Adaptive LEO Satellite Network Telemetry via Graph Isomorphism and Topology Partitioning. In *Proceedings of the 9th Asia-Pacific Workshop on Networking*.
- [15] Zhang, Y., Pan, T., Fu, Q., Zheng, Y., Feng, X., Liu, J., & Huang, T. (2024). In-band Network-Wide Telemetry for Topology-Varying LEO Satellite Networks. In *GLOBECOM 2024-2024 IEEE Global Communications Conference*.