

# 低轨巨型星座网络：组网技术与研究现状

陈全<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1</sup>, 郭剑鸣<sup>1,2</sup>, 李星辰<sup>3</sup>, 赵勇<sup>1</sup>, 陈小前<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 复杂飞行器系统仿真重点实验室, 北京 100094;  
3. 军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071)

**摘要:** 以新兴低轨巨型星座网络为研究对象, 概述了系统基本架构与工作模式, 总结了新兴巨型星座网络的基本特征。根据系统架构, 从卫星网络拓扑动态性管理、星地链路切换策略、路由算法设计、地面信关站布局优化设计以及网络仿真与性能评估 5 个方面系统梳理了各关键技术的主要技术路线和研究进展, 尤其是近期巨型星座的相关研究进展。重点分析了低轨巨型星座中星座规模和复杂度扩增对组网关键技术的挑战, 以及现有的各类解决方法在巨型星座宽带网络场景下的适用性。最后对未来巨型星座网络的相关研究方向进行了展望。

**关键词:** 低轨巨型星座; 宽带卫星网络; 星链; 卫星网络路由; 信关站布局; 卫星网络仿真

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022075

## LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art

CHEN Quan<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, GUO Jianming<sup>1,2</sup>, LI Xingchen<sup>3</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, CHEN Xiaoqian<sup>3</sup>

1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2. Science and Technology on Complex Aircraft System Simulation Laboratory, Beijing 100094, China

3. National Innovation Institute of Defense Technology, Chinese Academy of Military Science, Beijing 100071, China

**Abstract:** The emerging low earth orbit (LEO) mega-constellation network (MCN) represented by Starlink and OneWeb were studied. The system architecture and basic working modes were introduced, and the main features of the emerging broadband MCN were summarized. Based on the system architecture of MCN, the methodology and research progress of five key technologies were investigated and summarized, including network topology dynamics management, space-ground handover scheme, high-efficiency routing algorithm design, gateway placement design, network simulation and performance evaluation. The focus was on recent mega-constellation-related studies. The challenges caused by the large scale and complexity of MCN and the applicability of existing techniques and solutions in MCN were analyzed.

**Keywords:** low earth orbit mega-constellation, broadband satellite network, Starlink, satellite network routing, gateway placement, satellite network simulation

## 0 引言

低地球轨道 (LEO, low earth orbit) (以下简称低轨) 卫星星座以其广覆盖、全天候的特点成为弥补地面网络覆盖盲区最有效的解决方案, 是未来天

空地海一体化网络的重要组成部分<sup>[1]</sup>。20 世纪末, 以铱星、全球星为代表的星座计划掀起了第一代低轨星座网络浪潮, 但最终因无法与迅猛发展的地面网络竞争以及商业运营策略方面的失误而纷纷宣告失败<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-03-15

通信作者: 杨磊, craftyang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.11725211, No.12002383); 国防科技大学学校科研计划基金资助项目 (No.ZK22-02)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.11725211, No.12002383), The Research Project of National University of Defense Technology (No.ZK22-02)

近年来，以 Starlink、OneWeb 等为代表的庞大星座计划推动了新一轮的低轨巨型星座网络发展浪潮<sup>[3]</sup>。新兴的低轨巨型星座计划<sup>[4]</sup>一般包含数百至数万颗低轨卫星，目标是为全球用户提供无处不在的宽带互联网接入服务，具有大规模、广覆盖、低时延、宽带化、天地一体等特征。星座规模的急剧扩张不仅提升了系统容量，也增加了系统复杂度，为系统总体设计、网络运行管理和高效数据传输带来诸多难题：1) 卫星规模庞大，且节点高速运动，使网络拓扑高度复杂且具有强动态性；2) 用户被多星同时覆盖，星上频率协调复杂，且星地切换频繁；3) 网络节点密度高，端到端连接所需转发跳数大大增加，提高了路由传输的复杂度；4) 星地一体化网络需大量地面信关站支持连接，地面系统设计复杂<sup>[5]</sup>；5) 庞大的网络规模在网络仿真和性能评估时消耗大量计算资源，仿真耗时长。另一方面，巨型星座中网络拓扑具有规则性、周期性和可预测性，节点、链路资源冗余量大且星上处理能力增强，也为网络系统设计提供了机遇。

第一代低轨星座网络浪潮推动了卫星网络相关理论研究和工程项目实践发展，目前已有相关综述性研究，如星地切换策略<sup>[6]</sup>、路由算法<sup>[7]</sup>及星地一体化技术<sup>[8]</sup>等，但针对巨型星座的讨论较少。新兴巨型星座网络相较于传统卫星网络的新特征为相关组网技术带来新的挑战与机遇。本文将针对新兴低轨巨型星座网络的特征分析其具体设计难点，并总结研究进展。本文涵盖部分经典文献工作，但重点关注近 5 年内巨型星座相关的研究。

本文首先介绍了低轨巨型星座网络的系统架构与工作模式，分析了新兴巨型星座网络的具体特征以及相比于传统卫星网络的区别，随后从网络拓扑动态性管理、星地链路切换策略、路由算法设计、地面信关站布局优化以及网络仿真与性能评估 5 个方面梳理总结了各关键技术的难点、技术路线和研究进展，并分析了巨型星座场景下各项技术面临的新挑战与发展方向。本文内容可为未来低轨巨型星座宽带卫星网络设计理论研究提供参考。

## 1 系统架构与工作模式

### 1.1 系统架构

典型的低轨星座系统包括空间段、用户段和地面段 3 个部分<sup>[9]</sup>，如图 1 所示。

空间段由低轨卫星和星间链路组成，形成空间传输主干网络。卫星在空间中均匀排布，普遍采用均匀对称的星座构型<sup>[3]</sup>。巨型星座网络由于卫星规模庞大，多采用不同轨道高度、不同倾角的子星座构成多层混合星座<sup>[10]</sup>。卫星作为空间网络的接入节点，起到天基移动基站的功能。卫星间可建立微波或激光星间链路，实现数据包中继转发。

用户段包括各类用户终端、综合信息服务平台以及业务支撑系统等。用户终端也可作为接入点 (AP, access point) 建立局域网络，将通用用户设备接入网络。综合信息服务平台和业务支撑系统用于对用户业务提供支撑和应用层高级服务。

地面段包括信关站、综合运控管理系统以及连接地面核心网的基础设施。信关站起到连接卫星网

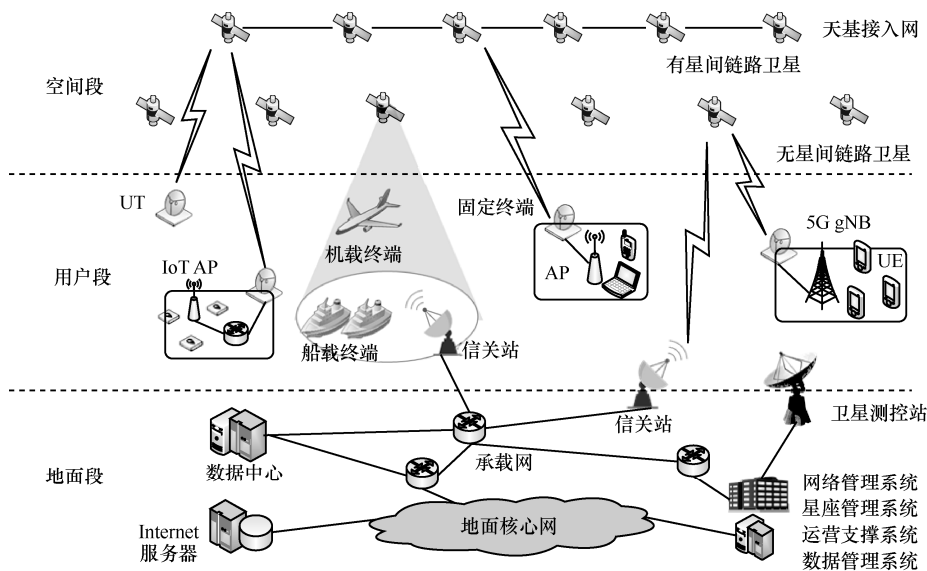


图 1 新兴低轨星座网络总体架构

络和地面网络的网关功能。数据经信关站接入地面网络,完成星地空口通信协议和网络协议转换,即可利用地面网络设施访问地面网络资源。综合运控管理系统包括网络、星座、数据、运营、数据等管理系统以及卫星测控站等,对全网进行综合管理和监控。

## 1.2 工作模式

根据空间网络与地面网络的关系,可将卫星网络工作模式分为天星地网、天基网络和天网地网三类<sup>[9,11]</sup>,如图2所示。

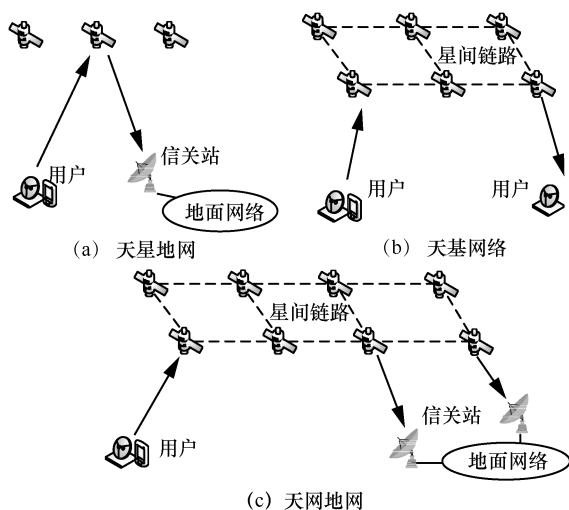


图2 低轨卫星网络工作模式

1) 天星地网。卫星间无星间链路连接,卫星将接收的地面用户数据直接转发至地面网络完成传输,卫星可看作地面网络的延伸。天星地网模式只有在用户和地面站被同一卫星覆盖时才能进行实时通信业务。目前 OneWeb 一期计划采用此种架构<sup>[9]</sup>。

2) 天基网络。用户间可直接通过卫星和星间链路实现端到端连接,而不需要地面网络设施参与。该架构摆脱了对地面网络设施的依赖,具有独立性、安全性和抗毁性优势<sup>[11]</sup>。

3) 天网地网。卫星间由星间链路连接,地面信关站通过地面网络连接。根据任务需求,用户数据可经卫星转发到另一端用户,也可经单跳或多跳星间转发到信关站,再通过地面网络完成传输。天网地网模式充分利用了卫星的广域覆盖优势和地面网络的容量、资源优势,实现了天地融合和优势互补,成为未来低轨卫星网络的发展趋势。

## 2 新兴巨型星座网络及特征

### 2.1 代表性巨型星座网络计划

自 2015 年起,大批低轨巨型星座计划被提出,

包括 Starlink、OneWeb 和 Kuiper 等代表性计划。

Starlink<sup>[4]</sup>由 SpaceX 公司提出,初期计划发射 4 408 颗工作在 540~570 km 高度的卫星为全球用户提供互联网服务。受益于批量化卫星制造、火箭重复利用、一箭多星发射等领先技术,Starlink 已成为新兴低轨星座中的佼佼者,截至 2021 年年底,Starlink 已部署超过 1 900 颗卫星,完成了 550 km 轨道层星座部署。下一步,Starlink 将部署其他轨道层星座并开始配备激光星间链路。后期 Starlink 还计划将总星座规模扩增至 4.2 万颗卫星<sup>[12]</sup>。

OneWeb<sup>[10]</sup>计划发射 716 颗轨道高度为 1 200 km 的卫星,构成极轨道/倾斜轨道混合星座提供宽带网络接入服务。截至 2021 年年底,OneWeb 已部署近 400 颗卫星,且未来计划将星座扩充至 6 372 颗卫星,以提高中低纬度地区的覆盖密度。

Kuiper<sup>[13]</sup>计划由亚马逊公司于 2019 年提出,旨在提供低成本的消费级和企业级宽带业务以及无线数据回程业务。星座包括工作在 590~630 km 高度的 3 236 颗倾斜轨道卫星。系统将在全球部署大量地面站,可与亚马逊网络服务(AWS, Amazon Web service)系统和计算基础设施联合,构建亚马逊公司的全球云服务智能网络系统。

### 2.2 新兴巨型星座网络特征

随着技术进步和市场需求变革,相比于早期的低轨星座,新兴低轨巨型星座网络具有大规模、广覆盖、低时延、宽带化、天地一体等特征,具体表现如下。

1) 低轨道混合星座设计。新兴巨型星座普遍采用 1200 km 以下的轨道高度,如 Starlink 一期轨道高度为 540~570 km,其后期还将采用 335~346 km 的超低轨道,具有低时延和低部署成本的优势。巨型星座大多采用多个轨道高度或倾角不同的星座层形成混合星座,如“低轨道/超低轨道星座”或“极轨道/倾斜轨道星座”组合等。混合星座通过部署大量倾斜轨道卫星覆盖中低纬度地区,且利用极轨道卫星补充高纬度覆盖,提升覆盖性能。

2) 星座规模迅速扩张。传统的低轨星座系统一般包含数十颗卫星,但新兴的低轨星座网络为满足系统容量的需求,将卫星数目扩增至上万颗。庞大的星座规模提高了地面终端通信仰角,减小了地面反射和多径衰落影响,也使系统具有更强的冗余性和抗毁性。

3) 通信宽带化。为适应日益增长的宽带业务需

求, 新兴低轨星座网络广泛采用 Ku、Ka 及以上频段。天上采用高通信频段、高增益天线、相控阵多波束、频率协调与复用等技术大幅提高通信带宽, 使单星容量可达数十 Gbit/s, 全网容量可达 Tbit/s 量级<sup>[10]</sup>。宽带业务对网络服务质量 (QoS, quality of service) 产生多样化需求, 包括时延、带宽、丢包率等。

4) 通信载荷轻型化、软件化、多样化。高通信频率和低轨道高度可实现地面终端天线小型化。天上载荷采用软件定义体制, 支持在轨功能重构和自适应调整, 迎合网络智能化发展趋势。此外, 系统还可通过搭载不同频段载荷, 在宽带通信业务之外拓展导航增强、高分对地观测和天基物联网等功能。

5) 天上处理与星间链路。新兴巨型星座大多具有天上处理能力, 可对接收的数据包进行解析、存储和转发, 而不局限于透明转发的工作模式。卫星间可建立微波或激光链路, 并且在运动过程中保持连接, 实现数据包在卫星间的转发。天上处理和星间链路使系统可工作在天网地网架构, 增强了系统独立性和灵活性。半导体技术的进步使卫星具有更强的天上处理和存储能力, 而激光星间链路技术可大幅提升星间通信速率, 适应宽带业务需求。

6) 星地一体化融合设计。新兴星座系统具有独立运行的能力, 但仍将星地一体化作为重点发展方向, 把依托与支持地面网络作为系统的设计基础。设计系统架构、协议、载荷时均考虑了与地面移动网络、互联网的兼容性和互操作性。

### 3 巨型星座组网关键技术难点与研究进展

低轨巨型星座系统具有诸多优势, 如卫星数目多, 系统冗余量大; 星座构型和网络拓扑具有规则性和可预测性; 天上处理性能提升, 自主决策能力强等。但巨型星座网络的新特征, 尤其是前所未有的星座规模, 也给网络设计带来诸多挑战, 如拓扑动态性强、星地切换频繁、路由传输负载不均衡性强、地面系统设计耦合因素多、网络性能评估开销大等。接下来, 将从以下 5 个方面具体分析巨型星座组网关键技术的难点, 并系统梳理其研究进展。

#### 3.1 网络拓扑动态性管理

低轨卫星高速运动造成网络拓扑始终处于动态变化中, 拓扑动态性主要表现为链路断开或重建切换现象。当链路信噪比、天线跟踪指向等不满足

建链条件时, 即发生链路中断。星间拓扑动态性特点及管理难点如下: 1) 同轨星间链路较稳定, 而异轨星间链路距离、指向均随卫星运动呈周期性变化; 2) 异轨星间链路在靠近极区时因变化剧烈而中断, 又在飞出极区后重建; 3) 极轨道星座存在运行方向相反的两轨道面, 形成“缝隙”, 缝隙两侧一般不建链, 并且缝隙随地球自转相对地面用户而移动。巨型星座中激增的卫星数目加剧了星间连接切换, 增加了网络拓扑动态性和管理开销。

另一方面, 由于卫星运动具有周期性和可预测性, 且星座拓扑具有规则性, 因此可构造虚拟的静态网络实现拓扑动态性管理。常用的拓扑动态性管理方法包括虚拟拓扑法和虚拟节点 (VN, virtual node) 法, 表 1 比较了二者的特点<sup>[14]</sup>和适用范围。

表 1 两类拓扑动态性管理方法比较

方法	天线类型	星座类型	卫星类型	拓扑个数	复杂度
虚拟拓扑法	不限	不限	不限	多个	高
虚拟节点法	地球固定 足印	极轨道, 单层星座	同构	一个	低

#### 3.1.1 虚拟拓扑法

虚拟拓扑法利用星座拓扑的可预测性将时间域离散划分为若干时间片 $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$ , 并认为拓扑仅在 $t_0, t_1, t_2, \dots$ 时刻发生变化, 而在时间片内保持不变, 如图 3 所示。每个时间片内网络拓扑均可看作静态, 因此可在时间片内采用静态网络算法<sup>[15]</sup>。每个时间片内的拓扑称为虚拟拓扑, 该概念与有限状态自动机 (FSA, finite state automation)<sup>[16]</sup>和快照<sup>[7]</sup>类似。

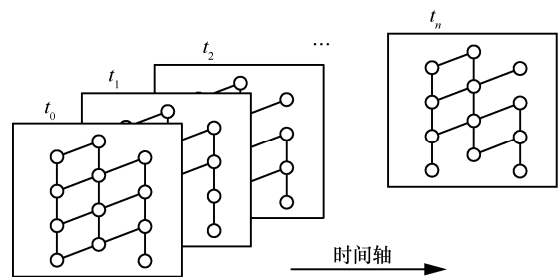


图 3 虚拟拓扑法示意

Wang 等<sup>[17]</sup>对低轨星座网络拓扑动态性进行了系统性量化, 针对 Walker 星座分析了静态拓扑的最大维持时间, 从理论上推导了拓扑切换时间间隔、快照数目与星座参数的具体关系。Jia 等<sup>[15]</sup>利用虚拟拓扑法获得若干离散的静态拓扑, 并在各拓扑内

采用深度优先和 Dijkstra 结合的算法生成路由。Liu 等<sup>[18]</sup>将虚拟拓扑法与虚拟节点法相结合, 利用虚拟拓扑法处理星座层间拓扑动态性, 而采用虚拟节点法处理层内拓扑动态性。

尽管虚拟拓扑法可用于多层混合星座, 但由于增加卫星数目将缩短拓扑维持时间和增加虚拟拓扑数目<sup>[17]</sup>, 进而导致较大的拓扑管理和路由开销, 因此虚拟拓扑法一般用于卫星数目较小或 QoS 要求低的星座, 而不适用于巨型星座宽带卫星网络。此外, 基于时空图或接触计划<sup>[19]</sup>的拓扑动态性管理方法基本思想与虚拟拓扑法相似, 也不适用于巨型星座。

### 3.1.2 虚拟节点法

虚拟节点法由 Mauger 等<sup>[20]</sup>首次提出, 后经 Ekici 等<sup>[21]</sup>发展推广, 广泛用于屏蔽极轨道星座拓扑动态性。虚拟节点法将地理区域划分为若干小区, 并称为虚拟节点。各虚拟节点分配有逻辑地址, 与其上空负责覆盖的卫星建立映射关系, 与卫星共享逻辑地址, 如图 4 所示。当卫星不再覆盖该小区时, 则虚拟节点映射至下一覆盖卫星, 由下一卫星继承上一卫星的逻辑地址和网络状态(包括路由表、信道分配等), 从而通过虚拟节点与卫星的动态映射构建静态的虚拟网络。Mauger 等<sup>[20]</sup>认为虚拟节点的映射切换可发生在当前卫星与同轨道面卫星内或异轨道面卫星间, 此时需频繁计算卫星与地面区域的覆盖关系, 并且当虚拟节点在不同轨道面间切换时, 将增加极轨道星座“缝隙”位置的不确定性<sup>[22]</sup>, 此时虚拟网络拓扑并非完全静态。Ekici 等<sup>[21]</sup>限定虚拟节点切换时仅由同一轨道面内的卫星继承, 因而虚拟节点间的连接关系保持不变, 可形成静态的虚拟网络。但该方法未考虑地球自转的影响, 映射建立较长时间后卫星轨道面将大幅偏离原覆盖的小区, 而无法完成轨道面内虚拟节点切换。在该方法下, 卫星天线需支持“地球固定”足印模式, 使波束始终指向固定覆盖区, 因此对天线要求较高。

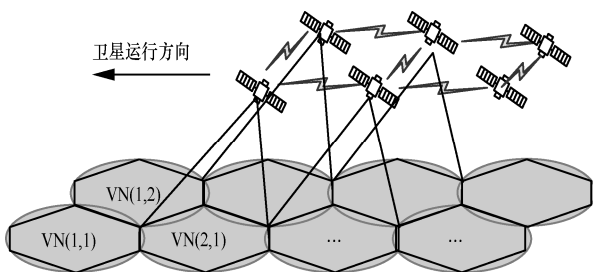


图 4 虚拟节点法示意

Korcak 等<sup>[23]</sup>对基于地理区域划分的虚拟节点法进行了系统总结与比较, 指出了虚拟节点法对“地球固定”和“卫星固定”足印天线模式的需求以及虚拟节点切换同步性问题, 并针对多颗卫星对应同一虚拟节点问题提出了多状态虚拟节点法。Lu 等<sup>[24]</sup>对基于卫星足印的虚拟节点法给出了规范的数学模型, 考虑了高纬度地区异轨星间链路中断、卫星失效带来的拓扑变化和“卫星固定”足印天线的路径收缩和扩张问题。Chen 等<sup>[22]</sup>提出了基于天球区域划分的虚拟节点 (CSD-VN, celestial sphere division based virtual node) 法来消除地球自转的影响, 给出了虚拟节点映射更新模型, 解决了相邻轨道卫星相位差带来的切换不同步问题, 并将该方法应用于单层巨型星座中。CSD-VN 法可将卫星间拓扑动态性完全屏蔽, 但无法解决星地之间的动态性, 完成用户间连接还需提前计算目标用户的覆盖卫星<sup>[25]</sup>。而基于地理区域划分的虚拟节点法可通过将用户与虚拟节点绑定实现用户移动性管理, 根据用户地理位置即可推知其覆盖卫星的虚拟地址。

### 3.2 星地链路切换策略

卫星相对地球的高速运动导致星地链路面临频繁切换问题, 而巨型星座由于采用低轨道高度和高通信仰角, 进一步加快切换频率。以 550 km 高度的卫星为例, 当通信仰角门限为 25°时, 平均切换间隔仅为 2~3 min。同时由于巨型星座主要面向宽带业务, 在频繁的链路切换过程中还应保证高带宽、低时延抖动等服务质量。此外, 巨型星座中卫星密集分布, 覆盖域高度重叠, 也增大了星地信道切换过程的频率协调难度。但另一方面, 卫星/用户信道感知和星上处理能力大幅提升, 因此可设计基于机器学习的智能切换策略优化切换性能, 提高资源利用效率和链路服务质量。

#### 3.2.1 波束间切换

星地链路切换可分为同一卫星波束间切换和不同卫星波束间切换。波束间切换策略又可依据信道分配方式分为固定信道分配 (FCA, fixed channel allocation)、动态信道分配 (DCA, dynamic channel allocation) 和自适应动态信道分配 (ADCA, adaptive DCA) 策略。FCA 策略根据频率复用规则把信道分配给固定的地面小区<sup>[26]</sup>, 只有在该小区内有空闲信道时才可完成波束切换。FCA 策略虽然简单, 但灵活性差, 易造成信道资源浪费。

DCA 策略把不同卫星的信道分组并放入信道池中, 可为任一连接请求分配满足信道复用距离的信道, 并把结束占用的信道收回信道池。DCA 策略的优势在于可以解决不同小区间流量变化和业务不均衡问题, 相比于 FCA 策略可提高资源利用率, 并有效降低连接阻塞率和中断率。ADCA 策略<sup>[27]</sup>在 DCA 策略的基础上引入了保护信道, 通过连续监测当前流量和用户位置信息预测未来连接阻塞概率, 动态调整最优保护信道数量, 实现保护信道占用量和切换质量的最优均衡。Liu 等<sup>[28]</sup>结合深度强化学习 (DRL, deep reinforcement learning) 与 DCA 策略, 提出了 DRL-DCA 算法, 把链路切换转换为马尔可夫决策过程, 采用状态重构和深度卷积神经网络提取问题特征, 最终得到决策矩阵。该方法可利用经验数据提高长周期切换性能并提升资源利用效率, 但强化学习的模型训练过程将产生大量计算开销, 复杂度较高。

### 3.2.2 卫星间切换

当卫星逐渐远离用户时, 用户需进行卫星间切换。卫星间切换也包含了波束切换过程, 但需先确定用户的下一服务卫星, 再在该卫星的波束内分配合适的信道<sup>[6]</sup>。表 2 列举并比较了多项卫星间切换策略的主要特性。Gkizeli 等<sup>[29]</sup>提出了 2 种卫星切换策略: 硬切换策略和混合信道自适应卫星分集 (H-CASD, hybrid channel adaptive satellite diversity) 切换策略。硬切换策略中设置切换阈值, 根据当前信号强度是否满足切换阈值要求做出切换决策, 可以减少切换信令开销, 并延迟切换时间和降低切换频率。H-CASD 切换策略引入双星覆盖的软切换机制, 在一般情况下采用硬切换策略而在特殊信道条件下采用软切换策略, 可进一步降低切换阻塞概率。

现有的研究主要采用三项指标作为切换准则<sup>[6]</sup>: 剩余连接时间、仰角与可用信道数。剩余连接时间影响卫星切换频次, 仰角影响通信距离和通信质量,

可用信道数影响网络负载。GSH (graph-based satellite handover) 策略<sup>[30]</sup>根据卫星对用户的覆盖时间关系将卫星间切换过程建模为有向图寻路模型。该模型可通过给有向图的边赋予不同权重支持不同的切换准则, 具有较高的通用性和灵活性。

巨型星座增加了切换频率及复杂性, 但也带来了新的机遇。密集卫星分布和星上存储、计算资源的提升给卫星切换过程提供了更多冗余资源。Li 等<sup>[31]</sup>面向巨型星座网络提出了用户中心切换策略 (UCHS, user-centric handover scheme), 根据卫星运动轨迹和实测信道状态更新用户的备选卫星, 利用巨型星座多星覆盖的优势, 在多个备选卫星上同时缓存用户下行数据。Starlink 仿真结果表明, UCHS 可减少切换耗时并实现无缝切换。考虑到巨型星座中切换频繁带来的信令开销, 多智能体强化学习 (MARL, multi-agent reinforcement learning) 切换策略<sup>[32]</sup>利用用户获取的局部网络信息训练强化学习模型, 采用 Q 学习算法确定切换决策, 可均衡卫星间负载和减少信令开销。

### 3.3 路由算法设计

巨型星座中密布的卫星导致星间传输跳数大幅增加, 也提高了路由传输复杂度。星间转发次数的增加在一定程度上降低了路由传输的可靠性, 因此路由算法应考虑节点/链路失效问题。当节点规模庞大时, 网络信令开销将占用大量网络资源<sup>[33]</sup>, 而网络拓扑的频繁切换会导致星上存储和维护的路由表规模激增<sup>[34]</sup>。而巨型星座网络中宽带业务量较大且分布不均衡, 使路由传输还面临着负载不均衡和网络拥塞的难题。另一方面, 巨型星座中卫星数目扩增也增大了路由的选择空间, 使两点间具有多条可达路径, 有利于提高路由冗余性和灵活性。而星上处理能力的提升增强了卫星自主决策能力, 使星上运行复杂路由计算及智能路由成为可能。

表 2 卫星间切换策略比较

切换策略	切换类型	切换准则	主要特性
硬切换策略	硬切换	信号强度	信号强度低于预设阈值时直接切换
H-CASD 切换策略	软切换	通信仰角	设置 2 个计时器, 判断是否需要第二颗卫星在信道切换前增加备用信道
GSH 策略	硬切换	多指标加权	根据星地连接关系将卫星切换转换为有向图寻路问题, 将切换指标作为边的权重
UCHS	软切换	信号强度	多星同时缓存用户下行数据, 实现无缝切换
MARL 切换策略	硬切换	切换次数/信道利用率	分布式策略, 利用用户获取的局部网络状态信息和强化学习方法确定切换决策

### 3.3.1 基本路由算法类型

表 3 列举了低轨卫星网络基本路由类型及特征。面向连接型路由主要针对早期异步传输网络和语音业务提出<sup>[20]</sup>。在端到端的传输路径建立后，同一数据流中的数据均遵循相同的预设路径传输，且全网预留出相应的资源保障数据流传输。而面向无连接型路由则省去了提前建立连接的过程，中继节点不需要获取连接状态信息，就可为每个数据包独立计算路由。面向连接型路由一般集中式生成，需提前获取全局网络状态信息，易产生预留资源浪费，但具有 QoS 性能优势<sup>[20]</sup>。面向无连接型路由则采用分布式算法<sup>[35]</sup>，可根据局部网络信息为数据包独立生成路由，具有强稳健性和灵活性，但对星上处理能力有一定要求。巨型星座网络主要提供宽带数据业务，并且节点规模大、网络复杂性高，难以承担集中式算法的信令开销，因此宜采用面向无连接型分布式路由算法。

DRA (datagram routing algorithm) 是 Ekici 等<sup>[21]</sup>针对极轨道星座提出的经典无连接型分布式路由算法，其算法思想为根据星座拓扑规则性得到二维 Mesh 状网络拓扑，并给各节点分配逻辑地址，再根据各节点距离目的地的相对距离逐跳生成最优转发路径。类似算法<sup>[36-37]</sup>之间的主要区别在于当数据包到达中继节点且有多个备选转发方向时，如何根据不同机制确定最优的唯一转发方向。此类路由算法大大降低了对计算和存储资源的占用，并且结合附加机制后可应对节点失效和链路拥塞问题，但路由决策仅依赖局部网络状态信息，无法保证全局最优性。

虚拟节点法在分布式路由算法中得到了广泛应

用<sup>[21,37-38]</sup>，其通过对卫星逻辑地址进行动态映射而建立虚拟的静态网络拓扑，在此基础上各节点可独立计算下一跳路由。而基于虚拟拓扑的路由算法<sup>[16,39]</sup>在星座规模较大时将产生大量的存储和计算开销，不适用于巨型星座网络。

### 3.3.2 负载均衡路由算法

网络负载不均衡性和拥塞现象在宽带业务为主的巨型星座网络中更加突出，目前已有多种针对负载均衡和拥塞避免的路由算法被提出。DRA<sup>[21]</sup>包含了简单的拥塞避免机制，可通过切换备选转发方向避开拥塞链路。ELB (explicit load balancing) 算法<sup>[40]</sup>主动检测链路拥塞情况，随后通知邻居节点使其降低传输速率并选择备选路径对流量进行分流。该算法可快速应对拥塞现象，但无法预测拥塞的发生。而 PAR (priority-based adaptive routing)<sup>[41]</sup>可根据链路排队情况预测拥塞状态，结合数据包传输率和丢包率的历史信息以及当前链路排队/缓存情况调整下一跳方向，从而根据网络拥塞状态生成不同的最小跳数路径，主动减少拥塞现象。

### 3.3.3 巨型星座网络路由算法

巨型星座要求算法复杂度低、稳健性强、灵活性强、效率高、可扩展性强。Qi 等<sup>[45]</sup>面向倾斜轨道巨型星座提出一种可扩展的分布式生存路由算法，采用有限泛洪和预先绕路机制应对链路失效，并且具有避免环路性能。基于 Starlink 的仿真结果表明，算法可有效地均衡时延和信令开销。Chen 等<sup>[37]</sup>等面向具有多信关站的巨型星座星地一体化网络提出一种分布式拥塞避免路由算法，首先按最小跳数准则为各卫星选择网关卫星作为目的节点，再以剩

表 3 低轨卫星网络基本路由类型及特征

路由类型	主要特性	巨型星座适用性
面向连接型	节点对之间先建立连接，所有数据包沿同一路径中继传输	×
面向无连接型	不同数据包在同一节点对之间可沿不同路径传输	√
集中式	中心节点为各节点集中生成路由表	×
分布式	每个节点为数据包单独计算到达目的地的路径	√
静态路由	按预设的固定路由表直接转发，不根据网络状态调整	×
动态（自适应）	根据实时网络状态的变化自适应更新路由决策	√
虚拟拓扑法	根据拓扑连接性划分若干时间片，每个时间片内虚拟拓扑保持静态	×
虚拟节点法	动态更新卫星和虚拟节点间的映射关系，构造静态虚拟节点网络	√

余跳数最少为原则确定最优转发方向, 实现剩余路径选择空间最大化, 可以简便且先验地避免拥塞。Li 等<sup>[46]</sup>为特定的 F-Rosette 巨型星座网络设计了一种分布式路由算法, 利用星座构型的特殊规则性对地理区域划分并对卫星节点编址, 从而解决了用户移动性管理问题。算法可根据目标用户逻辑地址直接推算下一跳转方向, 生成最小跳数路由, 但该方法仅适用于所述的特定星座类型。

### 3.3.4 智能路由算法

人工智能的蓬勃发展推动了机器学习在卫星网络路由中的应用。机器学习可通过预测网络流量变化辅助路由决策<sup>[47]</sup>, 也可通过学习网络状态直接做出路由决策<sup>[33]</sup>。Liu 等<sup>[33]</sup>提出了 DRL-ER 算法, 把路由由决策过程建模为马尔可夫过程, 采用深度强化学习方法学习网络拓扑动态性及路由转发规则并得到路由模型参数, 使各节点根据网络状态和路由模型做出路由决策。DRL-ER 的强化学习反馈中包含网络负载和卫星能量不均衡性因素, 使算法具有较优的负载和能量均衡性, 同时避免了实时状态信息交互的开销。Wu 等<sup>[42]</sup>面向软件定义卫星网络 (SDSN, software defined satellite network) 提出了结合分布式与集中式的路由算法, 其中开销均衡策略采用分布式思想为各节点快速确定下一跳节点, 控制器协作策略基于支持向量机利用有限信息实现状态同步, 智能路由利用软件定义网络 (SDN, software defined network) 集中式的优势保证 QoS 性能。人工智能为卫星网络路由算法提供了新思路, 但其具体结合方式、适用性和可实现性还需深入研究。

## 3.4 地面信关站布局优化设计

在星地一体化网络中, 信关站起到连接空间网络与地面网络的网关作用<sup>[48]</sup>。相比于传统星座, 巨型星座中单星服务范围缩小, 需要遍布全球的大量信关站连接卫星入网<sup>[5,49]</sup>。巨型星座中星间多跳转发将占用大量星间链路资源, 而增加信关站或优化信关站布局可减少星间转发跳数<sup>[8]</sup>。考虑到建设成本, 当信关站数目受限时可通过优化信关站布局以提升网络性能。宽带卫星网络与地面互联网深度融合, 还应考虑信关站与地面互联网骨干节点保持良好连接<sup>[50]</sup>。此外, 信关站布局与多种因素共同影响卫星网络性能, 如星座参数、路由算法、系统工作模式、用户业务模型等因素<sup>[3]</sup>。由于巨型星座网络中以上因素均与传统星座有所不同, 因此在优化信

关站布局时应综合考虑多因素影响。

### 3.4.1 稀疏星座信关站布局优化

一些研究关注光学馈电链路条件下的地面站选址设计。Lyras 等<sup>[51]</sup>通过分析月累积云层参数变化提出了光学链路地面站优化模型及求解算法。Fuchs 等<sup>[52]</sup>考虑单站与多站备份, 在馈电链路可用性约束下, 通过对地面站布局进行优化以实现最小化地面站部署成本。此外, Yang 等<sup>[48]</sup>和 Liu 等<sup>[53]</sup>研究了 SDN 体制下星地一体化网络中的控制器/信关站联合布局问题, 旨在寻找最优控制器/信关站布局实现网络时延最小化和网络可靠性最大化。

以上信关站布局优化问题大多面向高轨卫星, 而近年来低轨卫星网络场景 (如图 5 所示) 引发了更多研究, 相关研究汇总在表 4 中。Zhou 等<sup>[54]</sup>研究了天地融合物联网场景中信关站布局问题, 考虑气象条件对馈电链路容量的影响和地面业务密度分布, 得到中国境内的最优信关站布局。Zhu 等<sup>[55]</sup>研究了区域性地面站布局优化问题, 以最小化星间链路使用和最大化信关站链路容量为优化目标。该仿真场景采用了一个包含 72 颗卫星的星座, 但信关站数目小于 5 且仅限在中国境内, 优化结果显示信关站均位于中国国界边缘区域。

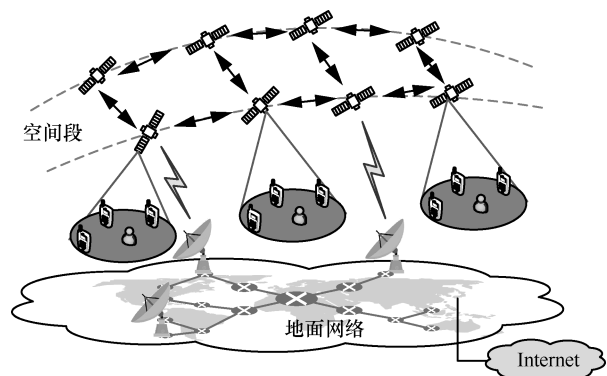


图 5 低轨星座网络信关站布局场景

### 3.4.2 巨型星座网络信关站布局优化

相比于传统低轨星座网络, 巨型星座系统中需要数目更多且分布更广的信关站, 且信关站布局对系统性能影响更加显著。Vasavada 等<sup>[60]</sup>针对具有星间链路的低轨巨型星座网络给出了系统总容量评价模型, 并以最小化星间链路容量占用为目标给出了信关站布局设计。其结果表明, 巨型星座中星间传输所需跳数相比传统星座大幅增加, 并且该跳数受信关站布局的直接影响。不足之处是仅给出了经

表 4 低轨星座网络信关站布局相关研究

研究工作	优化目标	求解方法	研究场景
文献[3]	网络平均时延、卫星负载及信关站负载均衡性	遗传算法	Starlink
文献[50]	信关站负载均衡性	改进的离散粒子群算法	OneWeb、Telesat
文献[54]	系统容量、时延及信关站数目	多目标遗传算法	类铱星星座，无星间链路
文献[55]	星间转发跳数、星地链路容量	模拟退火、遗传算法	72 星-倾斜轨道星座
文献[56]	卫星-信关站连接性	遗传算法	类 OneWeb 星座
文献[57]	系统容量	贪心算法	OneWeb
文献[58-59]	QoS 保证的系统总数传速率	多目标遗传算法	Starlink、OneWeb、Telesat

验性的信关站布局，并未对布局进行优化设计。Kopacz 等<sup>[56]</sup>以增强低轨巨型星座网络中卫星连接性为目标给出了简单的地面站布局设计算例，并给出了不同候选地址集下的最优信关站布局。Portillo 等<sup>[58]</sup>在限定信关站数目条件下提出了一种巨型星座网络信关站布局优化方法来最大化系统容量，主要考虑不同地理位置的星地链路大气衰减差异。作者在其经典论文<sup>[59]</sup>中采用相同的方法求解信关站布局，并分析了代表性巨型星座（即 OneWeb、Starlink 和 Telesat）中系统总容量与信关站数目的关系。

Liu 等<sup>[57]</sup>研究了 OneWeb 星座无星间链路场景下信关站布局问题，采用贪心算法思想，在每次迭代过程中选择边际收益最大化的信关站，其中收益主要由系统容量等网络性能衡量。刘立祥等<sup>[61]</sup>指出了信关站部署位置及布局对系统吞吐量和时延的重要影响，并给出了全球范围内部署 7 个信关站的用户时延空间分布，发现靠近信关站的用户具有明显较低的时延。Guo 等<sup>[50]</sup>认为信关站应部署在地面互联网交换关键节点附近以减少数据传输费用，采用流量估计重力模型预估各信关站负载情况，并以负载均衡性为目标求解得到 OneWeb 和 Telesat 网络中最优信关站布局。Chen 等<sup>[3]</sup>以网络平均时延、卫星负载和信关站负载均衡性构造了综合性能评价指标作为目标函数，求解了 Starlink 场景下最优信关站布局，并分析了信关站数目、天线数目、接入策略等因素对信关站布局的影响，结果表明信关站倾向于分布在用户业务密集、大陆边缘或大洋中心海岛等区域。

### 3.4.3 信关站布局优化求解方法

信关站布局问题一般被建模为组合优化模型，且模型中目标函数求解过程高度非线性化，因此相

关研究多采用启发式算法求解（如表 4 所示）。Portillo 等<sup>[58-59]</sup>采用遗传算法（GA, genetic algorithm）求解信关站布局优化问题，并利用地理区域分块来加速优化求解过程。Chen 等<sup>[3]</sup>将地理区域划分为若干网格，通过求解旅行商问题得到最优网格编码序列，再以候选信关站网格编号作为优化变量，建立整数优化模型，也采用遗传算法构造求解方法。Lyras 等<sup>[51]</sup>采用了 3 种优化算法来求解满足气象条件下的最少光学链路信关站数目问题。Liu 等<sup>[53]</sup>分析了信关站/控制器联合优化问题的计算复杂度，采用模拟退火和聚类融合算法求解该问题。Guo 等<sup>[50]</sup>采用改进的离散粒子群算法求解该组合优化问题，并通过大量仿真实验评估算法中各参数对求解性能的影响。以上研究表明了启发式算法在信关站布局优化问题中的适用性。

### 3.5 网络仿真与性能评估

在针对以上巨型星座网络组网相关技术的研究中，一般采用计算机仿真方法对算法进行验证与分析<sup>[62]</sup>。巨型星座由于其网络规模庞大、节点动态多变、异构节点繁多以及天地一体化耦合性强的特点，对网络仿真和性能评估技术要求更加苛刻。卫星网络仿真平台需集成卫星动力学仿真、网络仿真内核以及场景可视化等多个耦合模块，如图 6 所示。

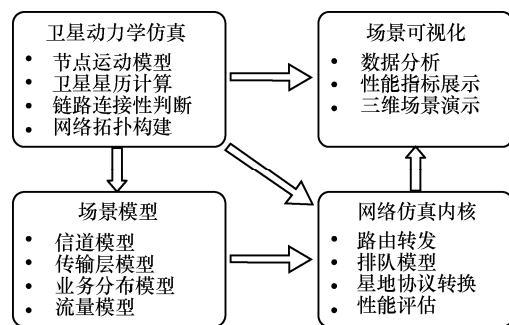


图 6 卫星网络仿真系统架构

### 3.5.1 卫星网络仿真工具

目前，常用的网络仿真软件包括 OPNET、QualNet/EXata、NS2/NS3、OMNeT++、Mininet 等，而卫星动力学和可视化模块常采用 STK (system tool kit) 软件实现。

Cheng 等<sup>[63]</sup>总结了各类仿真工具的特征及适用场景。OPNET 和 QualNet/EXata 是应用最广泛的商业网络仿真软件，可面向多种网络场景进行通用网络仿真，拥有完善的协议库和图形界面，其中 QualNet/EXata 仿真速度较快，可采用并行仿真模式，并且支持网络半实物仿真。NS2 和 NS3 是面向对象的离散时间仿真器，也是学术界应用最广泛的网络仿真工具。二者的最大区别在于 NS3 的核心代码和功能模块完全基于 C++ 开发，并且提供了 Python 拓展接口，更便于用户开发，但目前其协议库的完整性仍弱于 NS2。NS2 已停止更新，而 NS3 作为 NS2 的升级还在不断更新与拓展功能。OMNeT++ 是一个开源的多协议离散事件仿真软件，采用嵌套层次结构，其基本组件是包含各类协议的模块，可通过各模块的组合嵌套拓展不同场景的网络仿真应用。Mininet 是一种支持 SDN 的虚拟网络仿真平台，可利用 Linux 内核提供的轻量级虚拟机制来创建网络模型并模拟节点之间的数据交互，具有良好的可扩展性和可移植性。

### 3.5.2 巨型星座网络仿真平台

针对巨型星座节点规模大、网络仿真复杂度高的特点，一些学者设计了低成本、高可扩展性的仿真平台。杨增印等<sup>[62]</sup>采用运行真实互联网协议的虚拟网络设备搭建了天地一体化网络域间协议仿真平台。仿真中先基于 STK 和 MATLAB 获取动态拓扑特征 (包括链路距离、衰减、连接情况等)，再将拓扑特征映射至虚拟网络中，通过改变虚拟网络设备的连接状态来模拟动态拓扑变化。为避免离散事件仿真器降低协议验证效率及仿真开销随网络规模剧增问题，采用 Mininet 和 Quagga 模拟虚拟网络和虚拟路由器，搭建空间网络模拟平台。平台可

支持现有域间协议及其所依赖的网络层和传输层协议，具有较强的可扩展性和移植性。为分析巨型星座网络特性，Lai 等<sup>[64]</sup>采用类似的架构搭建了 StarPerf 平台。StarPerf 将网络拓扑信息、网络协议规则和流量模型作为输入信息，运行网络仿真内核获得网络性能。

Handley<sup>[65]</sup>基于 C# 和 Unity 3D 开发了巨型星座网络可视化仿真平台，直观地展示了 Starlink 星座中星间传输路径选择和切换场景。Kassing 等<sup>[12]</sup>集成 NS3、Python 和 Cesium 等工具建立了 Hypatia 仿真平台，其中 Pyephem 工具包计算各卫星星历，NetworkX 工具包在每个时隙内根据网络拓扑为节点间的数据传输生成路由，NS3 用于仿真数据包转发过程，最后 Cesium 实现三维场景可视化。作者基于 Hypatia 分析了 Starlink、Kuiper、Telesat 等巨型星座的端到端时延特性，并且考虑了传输层拥塞问题。Bhattacharjee 等<sup>[13]</sup>基于 Hypatia 平台分析了巨型星座星间链路拓扑特性以及跳数对网络性能的影响。表 5 总结了各仿真平台的构成及特点。

考虑到网络仿真平台在巨型星座场景下的巨大仿真开销，也有诸多学者采用较简单的分析方法对巨型星座网络进行性能评估与分析。Portillo 等<sup>[59]</sup>采用最大流的方法评估并比较了 3 个代表性巨型星座 Starlink、OneWeb 和 Telesat 的网络性能，引发了广泛关注。Lee 等<sup>[44]</sup>采用动力学理论模型分析了巨型星座中相邻卫星间的可见性，以及星座规模、星座参数对星间链路连接性的影响。

## 4 巨型星座网络技术研究展望

### 4.1 人工智能广泛应用

卫星网络中的决策、设计问题一般都可建模为优化问题。巨型星座中此类问题的规模和复杂度均显著提升，可以采用人工智能中的相关算法如神经网络、强化学习等方法求解。神经网络方法可用于网络流量特征提取和流量预测，从而预测网络状态，辅助路由决策。强化学习可以根据链路状态信

表 5 典型卫星网络仿真平台

仿真平台	主要仿真工具	特征
Hypatia	NS3、Python、Cesium	可视化效果好，可实现数据包级别仿真，在离散的静态拓扑上实现数据包传输
SAGIN-Sim	NS3、STK、MATLAB、Python	空天地一体化，支持各类异构算法，可扩展性强，但复杂度高，对硬件要求高
StarPerf	Mininet、STK、MATLAB	虚拟网络仿真平台，非离散时间仿真，可扩展性强，适用于大规模网络场景及 SDN
Starlink-Sim	Unity 3D、C#	星间传输路径可视化效果好，但无法进行数据包级别仿真

息训练决策模型,用于卫星切换问题。对于网络设计中的大规模优化问题,也可以转换为强化学习模型进行求解。随着星上处理能力的提升,人工智能将推动卫星网络向自主化、智能化方向发展。

#### 4.2 软件定义网络技术

软件定义网络技术可将卫星网络中的数据平面与控制平面分离,使网络的控制管理功能集中在控制器节点,而大多数卫星节点只需承担数据转发任务。考虑到巨型星座网络部署时间长、硬件在轨维护难度大等问题,SDSN可通过软件重配置对卫星进行功能升级或重构,增强了卫星网络中设备的互操作性,并且有利于实现灵活的路由策略、星地网络协议融合和同步更新。

SDSN面临的难题在于其集中式的管理体制需要在网络中生成中心控制节点,并且各节点和控制中心间需要频繁交互网络状态信息,产生较大的信令开销,而这一开销在巨型星座中尤其严重。因此可采用集中式与分布式结合的网络架构,在减少信令开销的同时,实现局部子网络的最优配置;还可通过优化控制器在地面段、单层星座、混合星座中的部署位置提高网络管理效率,减少信令开销。

#### 4.3 天地一体融合设计

6G的愿景提出要实现全域覆盖的应用场景,将建设空天地海一体化网络,而低轨巨型星座将是其中关键的组成部分。未来巨型星座网络将与地面网络进一步深度融合,在网络架构设计,星间、星地、地面传输链路选择,星地切换,天地协同信息处理,星地网络协议互联互通等方面开辟新的研究方向。由于天地一体化场景包含多种异构网络场景,因此网络仿真系统将更加复杂,需包含多种网络节点并支持相应的网络协议,具有更高的兼容性和可扩展性要求。

### 5 结束语

本文对未来低轨巨型星座网络及其组网相关技术进行了系统梳理和文献调研。新兴巨型星座对卫星网络带来的挑战体现在星座规模大幅扩增加剧了星间拓扑动态性,提高了星地链路切换频率,增加了星间转发跳数和路由传输复杂度,增大了网络仿真开销和性能评估难度;宽带用户业务加重了星间链路负担和网络流量分布不均衡性;星地一体化模式加大了对地面网络设施和资源的依赖性,提高了网络系统耦合性和地面系统设计难度。

本文工作可为未来巨型星座网络设计提供参考。巨型星座网络应主要采用分布式算法以降低算法开销和提高可扩展性,采用动态自适应算法应对网络的高动态变化,提升灵活性和稳健性。此外,未来相关算法可充分利用巨型星座的冗余节点资源提高服务质量,利用机器学习方法和星上计算性能的升级提高星上自主智能化决策能力,减少对地面设施的依赖,提高卫星网络软件化、智能化水平。

#### 参考文献:

- [1] 陈全. 面向低轨巨型星座的星地一体化网络关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.  
CHEN Q. Towards LEO mega-constellation: study on integrated satellite-terrestrial networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [2] BUTASH T, GARLAND P, EVANS B. Non-geostationary satellite orbit communications satellite constellations history[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(1): 1-5.
- [3] CHEN Q, YANG L, LIU X F, et al. Multiple gateway placement in large-scale constellation networks with inter-satellite links[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(1): 47-64.
- [4] 周兵, 刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评[J]. 电讯技术, 2018, 58(9): 1108-1114.  
ZHOU B, LIU H J. Development review of foreign emerging commercial LEO satellite communication (SATCOM) constellations[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(9): 1108-1114.
- [5] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, FOGGI T, et al. LTE-based satellite communications in LEO mega-constellations[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2019, 37(4): 316-330.
- [6] CHOWDHURY P K, ATIQUZZAMAN M, IVANCIC W. Handover schemes in satellite networks: state-of-the-art and future research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(4): 2-14.
- [7] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [8] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [9] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.  
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [10] PACHLER N, PORTILLO I D, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [11] 徐晓帆, 王妮炜, 高瓊园, 等. 陆海空天一体化信息网络发展

- 研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 39-45.
- XU X F, WANG N W, GAO Y Y, et al. Development of land-sea-air-space integrated information network[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 39-45.
- [12] KASSING S, BHATTACHERJEE D, ÁGUAS A B, et al. Exploring the “Internet from space” with hypatia[C]//Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference. New York: ACM Press, 2020: 214-229.
- [13] BHATTACHERJEE D, SINGLA A. Network topology design at 27 000 km/hour[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. [S.l.:s.n.], 2019: 341-354.
- [14] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1085-1100.
- LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Routing techniques on satellite networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1085-1100.
- [15] JIA M, ZHU S Y, WANG L F, et al. Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN[J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23(2): 285-300.
- [16] LONG F. Satellite network robust QoS-aware routing[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [17] WANG J F, LI L, ZHOU M T. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.
- [18] LIU Z G, ZHU J, ZHANG J M, et al. Routing algorithm design of satellite network architecture based on SDN and ICN[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(1): 1-15.
- [19] ZHANG T, LI J D, LI H Y, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(2): 179-185.
- [20] MAUGER R, ROSENBERG C. QoS guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(7): 56-65.
- [21] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [22] CHEN Q, GUO J M, YANG L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 433-437.
- [23] KORÇAK Ö, ALAGÖZ F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [24] LU Y, SUN F C, ZHAO Y J. Virtual topology for LEO satellite networks based on earth-fixed footprint mode[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 357-360.
- [25] 李贺武, 刘李鑫, 刘君, 等. 基于位置的天地一体化网络路由寻址机制研究[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 120-129.
- LI H W, LIU L X, LIU J, et al. Location based routing addressing mechanism of integrated satellite and terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 120-129.
- [26] RE E D, FANTACCI R, GIAMBENE G. Handover queuing strategies with dynamic and fixed channel allocation techniques in low Earth orbit mobile satellite systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(1): 89-102.
- [27] CHO S, AKYILDIZ I F, BENDER M D, et al. A new connection admission control for spotbeam handover in LEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(4): 403-415.
- [28] LIU S J, HU X, WANG W D. Deep reinforcement learning based dynamic channel allocation algorithm in multibeam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15733-15742.
- [29] GKIZELI M, TAFAZOLLI R, EVANS B G. Hybrid channel adaptive handover scheme for non-GEO satellite diversity based systems[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(7): 284-286.
- [30] WU Z F, JIN F L, LUO J X, et al. A graph-based satellite handover framework for LEO satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1547-1550.
- [31] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. A user-centric handover scheme for ultra-dense LEO satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1904-1908.
- [32] HE S X, WANG T Y, WANG S W. Load-aware satellite handover strategy based on multi-agent reinforcement learning[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [33] LIU J H, ZHAO B K, XIN Q, et al. DRL-ER: an intelligent energy-aware routing protocol with guaranteed delay bounds in satellite mega-constellations[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(4): 2872-2884.
- [34] 朱立东, 张勇, 贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 33-42.
- ZHU L D, ZHANG Y, JIA G Y. Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 33-42.
- [35] ROTH M, BRANDT H, BISCHL H. Implementation of a geographical routing scheme for low Earth orbiting satellite constellations using intersatellite links[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(1): 92-107.
- [36] PAPANETROU E, KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F N. Distributed on-demand routing for LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2007, 51(15): 4356-4376.
- [37] CHEN Q, CHEN X Q, YANG L, et al. A distributed congestion avoidance routing algorithm in mega-constellation network with multi-gateway[J]. Acta Astronautica, 2019, 162: 376-387.
- [38] LIU P L, CHEN H Y, WEI S J, et al. Hybrid-Traffic-Detour based load balancing for onboard routing in LEO satellite networks[J]. China Communications, 2018, 15(6): 28-41.
- [39] WERNER M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [40] TALEB T, MASHIMO D, JAMALIPOUR A, et al. Explicit load balancing technique for NGEOSatellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1): 281-293.
- [41] KORÇAK Ö, ALAGÖZ F, JAMALIPOUR A. Priority-based adaptive routing in NGEOSatellite networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2007, 20(3): 313-333.
- [42] WU S, YANG L, GUO J M, et al. Intelligent quality of service routing in software-defined satellite networking[J]. IEEE Access, 2019, 7: 155281-155298.
- [43] CHANG H S, KM B W, LEE C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions

- on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037-1048.
- [44] LEE Y, CHOI J P. Connectivity analysis of mega-constellation satellite networks with optical intersatellite links[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(6): 4213-4226.
- [45] QI X X, ZHANG B, QIU Z L. A distributed survivable routing algorithm for mega-constellations with inclined orbits[J]. IEEE Access, 2020, 8: 219199-219213.
- [46] LI Y J, LI H W, LIU L X, et al. Fractal rosette: a stable space-ground network structure in mega-constellation[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2105.05560, 2021.
- [47] YE S Y, ZHANG Y, YAO W, et al. An effective surrogate ensemble modeling method for satellite coverage traffic volume prediction[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3689.
- [48] YANG K Z, ZHANG B N, GUO D X. Partition-based joint placement of gateway and controller in SDN-enabled integrated satellite-terrestrial networks[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(12): 2774.
- [49] DE COLA T, GINESI A, GIAMBENE G, et al. Network and protocol architectures for future satellite systems[J]. Foundations and Trends® in Networking, 2017, 12(1/2): 1-161.
- [50] GUO J M, RINCÓN D, SALLEN T S, et al. Gateway placement optimization in LEO satellite networks based on traffic estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3860-3876.
- [51] LYRAS N K, EFREM C N, KOUROGIORGAS C I, et al. Optimum monthly based selection of ground stations for optical satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1192-1195.
- [52] FUCHS C, MOLL F. Ground Station network optimization for space-to-ground optical communication links[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(12): 1148-1159.
- [53] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 221-232.
- [54] ZHOU D, SHENG M, WU J X, et al. Gateway placement in integrated satellite-terrestrial networks: supporting communications and Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4421-4434.
- [55] ZHU C Y, LI Y T, ZHANG M Q, et al. An optimization method for the gateway station deployment in LEO satellite systems[C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [56] KOPACZ J R, RONEY J, HERSCHITZ R. Optimized ground station placement for a mega constellation using a genetic algorithm[C]//Proceedings of the 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Reston: AIAA, 2019: 1-9.
- [57] LIU S J, WU T, HU Y M, et al. Throughput evaluation and ground station planning for LEO satellite constellation networks[C]//Space Information Networks. [S.l.:s.n.], 2020: 3-15.
- [58] PORTILLO I D, CAMERON B, CRAWLEY E. Ground segment architectures for large LEO constellations with feeder links in EHF-bands[C]//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-14.
- [59] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [60] VASAVADA Y, GOPAL R, RAVISHANKAR C, et al. Architectures for next generation high throughput satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2016, 34(4): 523-546.
- [61] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 87-93.
- LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 87-93.
- [62] 杨增印, 李贺武, 吴茜, 等. 天地一体化信息网络域间协议实验平台[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 1-12.
- YANG Z Y, LI H W, WU Q, et al. Emulation platform for inter-domain protocols validation of integrated space-terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(5): 1-12.
- [63] CHENG N, QUAN W, SHI W S, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 178-185.
- [64] LAI Z Q, LI H W, LI J H. StarPerf: characterizing network performance for emerging mega-constellations[C]//Proceedings of 2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-11.
- [65] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 85-91.

#### [作者简介]



陈全 (1993- ), 男, 安徽宿州人, 博士, 国防科技大学讲师, 主要研究方向为低轨卫星网络、无人机通信网络、微纳卫星技术等。

杨磊 (1979- ), 男, 河南洛阳人, 博士, 国防科技大学研究员, 主要研究方向为空间信息网络、卫星集群网络等。

郭剑鸣 (1993- ), 男, 湖北襄阳人, 博士, 复杂飞行器系统仿真重点实验室助理研究员, 主要研究方向为低轨卫星网络、软件定义网络等。

李星辰 (1991- ), 男, 河南郑州人, 博士, 军事科学院助理研究员, 主要研究方向为微纳卫星技术、低轨卫星网络等。

赵勇 (1977- ), 男, 湖南沅江人, 博士, 国防科技大学教授, 主要研究方向为微纳卫星技术、空间信息网络等。

陈小前 (1975- ), 男, 湖南双峰人, 博士, 军事科学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为飞行器多学科优化设计、空间信息网络等。