

低轨巨型星座体系架构设计与关键技术分析

高梓贺¹, 姚海鹏², 张磊¹, 石钰林¹, 王富², 陶滢¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘 要: 巨型星座中海量网元对现有网络架构和技术体制提出了严峻挑战, 如何设计和规划网络体系架构是巨型星座发展的关键问题之一。从星座架构的概念与特征出发, 结合国内外卫星星座发展情况与技术预判, 提出“四面”(感知平面、数据平面、控制平面、智能管理平面)和“三层”(资源层、传送层、业务层)的多层多域混合式智能协同组网体系架构, 设计星座网络管控架构、技术参考模型与协议架构等。同时, 针对星座建设与发展趋势, 阐述并分析星座网络编址路由、网络鲁棒性敏捷保障、差异化业务承载、端到端可靠传送等关键技术的演化趋势, 支撑我国低轨巨型星座网络发展与建设。

关键词: 巨型星座; 组网体系架构; 技术参考模型; 协议架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024015

Architecture Design and Key Technologies Analysis of LEO Satellite Mega-Constellations

GAO Zihe¹, YAO Haipeng², ZHANG Lei¹, SHI Yulin¹, WANG Fu², TAO Ying¹

1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The large number of network elements in the mega-constellations pose a severe challenge to the existing network architecture and technical system. Based on the concept and characteristics of constellation architecture, combined with the development of domestic and foreign satellite constellations and technology prediction, a multi-layer and multi-domain hybrid intelligent cooperative network architecture was proposed, which consist of four layers (perception plane, data plane, control plane, intelligent management plane) and three layers (resource layer, transport layer, service layer), the architecture of constellation network management and control, technology reference model and protocol architecture were designed. At the same time, accorded to the construction and development trend of constellation, this paper expounded and analyzed the evolution trend of the key technologies, such as constellation network addressing and routing, network robust agile guarantee, differentiated service bearing, end-to-end reliable transmission, etc. The research results could support the development and construction of LEO giant constellation network in our country.

Keywords: mega-constellation, networking architecture, technology reference model, protocol architecture

0 引言

星地融合网络是支撑我国“网络强国”“航天强国”“数字经济”等战略的重要信息基础设施^[1]。囿于复杂星座构型、单星载荷受限等约束, 星地融合网络无法直接继承地面网络现有方案。现有基于海量低轨卫星(Low Earth Orbit,

LEO)的卫星网络具有星座构型复杂、星间拓扑高动态、单星载荷资源受限、星间星地链路异构等特点, 是限制星地融合网络实现全球覆盖、全天候无缝接入、天地深度融合发展的关键难题。随着国外星链(Starlink)系统^[2]、OneWeb星座^[3]、美军“国防太空架构”计划^[4]的提出与建设实施, 星座空间段卫星的规模也逐渐由几百颗向数千乃

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-05-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No.2022YFB2902501)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902501)

至数万颗规模爆炸式增长。我国天算星座、天智二号^[5]等卫星发射,在新型网络计算、融合服务计算、分布式智能计算、软件定义卫星等技术方向取得了长足进步,为未来星座建设提供了良好的技术基础。与传统星座相比,由于在轨卫星数目激增,星座的体系架构往往难以直接沿用以往架构,如何结合星地融合网络发展需求与技术预判,设计星座体系架构成为领域发展的瓶颈和关键。

目前,低轨巨型星座架构与系统已经引起了国内外的广泛关注。在 2020 年 MIT 发布的《2020 年十大突破性技术》中^[6],将星座描述为“在地球轨道上建造、发射和运行的成千上万颗卫星”,并通过该巨型星座实现高速互联网覆盖全球。参考文献[7]列举了 2015 年的国外多项星座计划,包括星链系统(初期 4 408 颗,后期 4.2 万颗)、OneWeb 星座(初期 716 颗,未来计划 6 372 颗)、Kuiper 星座(3 236 颗)等,同时对新兴巨型星座的网络特征进行了阐述。参考文献[8]研究了基于大量低成本微小卫星组建的巨型星座网络,并针对星链系统 1 584 颗卫星、Kuiper 星座 1 296 颗卫星进行了覆盖性仿真分析和优化设计。

低轨巨型星座最为典型的特征是具有海量 LEO 卫星节点,因此本文对低轨巨型星座的概念定义如下:“低轨巨型星座是由近地球轨道内成千上万乃至几十万颗卫星,通过动态星间/星地链路组成的巨型卫星星座系统”。与传统星座相比,低轨巨型星座网络具有如下典型特征。

(1) 空间段卫星数目激增导致卫星星座设计异常复杂。低地球轨道空间内可容纳的卫星数目与星间安全距离、星座具体构型、星座覆盖需求等紧密相关,通过数值实验分析^[9-10],在 500 km 轨道高度的壳层内,安全距离 50 km 时,最多可容纳 5 000 颗卫星。因此,对于成千上万乃至几十万颗卫星组成的星座,往往进行分层设计。

(2) 空间段网络拓扑动态变化剧烈。随着星间激光通信链路技术发展成熟与在轨应用,未来将构建太空的“光纤网”,实现基于星间链路的大规模网状组网。低轨巨型星座空间段卫星数量巨大,导致星座星间链路数目也相对增加(几十万条甚至上百万条星间链路);卫星之间的相对运动使得跨星座构型组网链路、跨星座层/域组网链路高速、快速变化,给网络拓扑预测与路由带来很大困难。

(3) 星座网络管控难度进一步提升。随着空间段卫星数目、星间/星地动态链路激增,以及不可预期的卫星节点、链路、网络故障发生,单纯依赖地面管控中心实现全星座网络管控变得更加困难。因此,如何引入新的技术实现低轨巨型卫星星座的自我感知、自我监测,以及网络服务能力的自修复、自愈合变得尤为重要。

论文后续的研究内容和关键技术都应该围绕以上 3 个典型特征。从国内外星座体系发展、“三层四面”网络体系架构、低轨巨型星座关键技术等 3 个方面对现有技术发展趋势进行论述和归纳。基于本文提出的“三层四面”架构,低轨巨型星座可以实现阶段化部署和层次化协议管理,推动低轨巨型星座网络化发展的技术落地。

1 国内外系统与技术发展现状

1.1 国外系统发展

在国外低轨巨型星座论证建设方面,商用系统以星链系统、OneWeb 星座、Kuiper 星座等为代表,系统以美太空军“七层体系”为代表。本文以星链系统和美太空军“七层体系”为代表进行阐述。

(1) 星链系统

星链系统是美国 SpaceX 公司主导研制和建设的低轨巨型星座系统。该系统计划自 2018 年提出以来,经过多轮次快速迭代,截至 2024 年 3 月,已经完成多个型号超过 5 000 颗卫星的在轨组网运行。

第一期星座。Starlink 第一期星座部署 4 409 颗卫星,分布在 123 个轨道面上,轨道高度从 550 km 到 1 325 km 不等,在用户端最低 40°仰角条件下,可满足全球无缝覆盖。SpaceX 公司计划分两个阶段建设该系统,第一阶段发射 1 584 颗卫星,分布于 72 个 550 km 的轨道面上,每个轨道面 22 颗卫星;第二阶段发射 2 825 颗卫星,分布于 1 110 km、1 130 km、1 275 km 和 1 325 km 等 4 个不同轨道高度,分别对应 32 个、8 个、5 个、6 个轨道面,各轨道面 50~75 颗卫星不等。此外,受美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)监管要求,SpaceX 星座部署工作首先着眼于美国本土全境覆盖,随后继续布星完成全球覆盖。

第二期星座及后续规划。SpaceX 公司提出的 7 518 颗 V 频段低轨巨型卫星星座,轨道设计高度分布在 330~350 km 范围内,根据其向国际电信联盟提交的申报材料,其远期目标要部署 42 000 颗卫星。后续部署的 30 000 颗第三期星座称为“星链”二代,将部署在多个不同轨道高度,范围在 340~614 km 之间。

(2) 美太空军“七层体系”

美国太空发展局(SDA)正在为美军开发下一代太空架构——“国防太空架构”,旨在构建一种“扩散型低地球轨道(pLEO)”太空架构,统一整合美国国防部下一代太空能力,实现韧性低轨星座感知和数据传输。“国防太空架构”主要由以下功能层组成。

传输层是“国防太空架构”的主干，旨在为全球范围内的军事作战人员应用提供可靠、灵活、低时延的军事数据和连接。2020年4月，美国太空发展局发布了“传输层0期”征询草案。“传输层0期”是一种测试和训练“螺旋”，其最终成果主要有两方面：一是系统能力实验和演示，可以整合并实现与其他运行实体兼容；二是可以作为后续阶段发展基线。

传输层由太空段和地面段（主要由政府提供）组成。太空段包括一个由20颗卫星组成的异构星座，地面段位于美国海军研究实验室的卫星运行中心。“传输层0期”实验星座包含两个近极轨道面，轨道面高度为1 000 km，倾角在80°到100°之间。每个平面的卫星分为两组：A组卫星提供连接整个星座的完整网络基础设施，B组卫星通过综合广播系统和Link 16支持平面交链和任务通信。A组卫星在平面上均匀分布，可以支持与地面的持续联络和双向交链；B组卫星呈“簇”状，可支持在多个时间段内对某一战区的连续覆盖，并进行测试和实验。

1.2 国内系统发展

近年来，星座系统在国内的发展加速进行。

上海垣信卫星科技有限公司提出了千帆低轨卫星星座，该星座包括3代卫星系统，采用全频段、多层多轨道星座设计。第一阶段计划到2025年年底，实现648颗卫星提供区域网络覆盖；第二阶段计划到2027年年底，实现648颗卫星提供全球网络覆盖；第三阶段计划到2030年年底，实现15 000颗卫星提供手机直连卫星多业务融合服务。

银河航天（北京）科技有限公司于2018年推出银河星座计划。2020年1月，首颗通信能力达10 Gbit/s的低轨宽带通信卫星即银河航天首发星升空；2023年7月23日，灵犀03星发射升空，是我国首款使用柔性太阳翼的低轨宽带通信卫星。

北京国电高科科技有限公司提出了天启星座，计划发射38颗低轨卫星，构建覆盖全球的物联网数据服务系统。2021年7月天启15号卫星成功发射，标志第一阶段组网完成。2022年2月，天启星座19星（天启星座的第15颗卫星）成功发射，标志第二阶段组网建设正式开始。

在低轨巨型星座关键技术在轨验证方面，北京邮电大学建设了天算星座，通过对卫星智能化、服务化、开放化设计，聚焦新型网络计算、融合服务计算、分布式智能计算等方向，构建了产学研用一体化的空天计算在轨试验开放开源平台；软件定义卫星（天智一号、天智二号）由中国科学院软件研究所牵头研制，是我国首颗软件定义卫星，也是全球首颗实际开展工程研制并发射的软件定义卫星。

从目前发展来看，国内低轨星座的卫星数量仍然较少，星座网络拓扑与组网路由相对简单，在体系架构、协议体制、编址路由、可靠性传输等技术攻关方面与国外仍存在差距。

1.3 体系架构研究情况

针对未来低轨信息网络，中国空间技术研究院、鹏程实验室王宁远、陈东研究团队提出了基于软件定义网络和网络功能虚拟化的全云化卫星5G融合网络架构^[1]，使网络具备架构可编程、网络功能抽象解耦，以及去中心化等优势，最终实现网络的多业务承载、持续演进、自动化管理等能力。

北京理工大学武楠研究团队结合软件定义网络、网络功能虚拟化、人工智能等技术发展，提出了智能化与虚拟化驱动的星地融合网络体系架构^[2]，从逻辑域和功能架构方面描述了该网络智能重构、按需适变、高效管控等主要能力，并规划了网络体系架构的远期远景发展路径。

中国电子科学研究院郑作亚研究团队基于网络信息体系思维，提出了一种由天基骨干网、低轨接入网和地基节点网等组成的天地一体化信息网络^[3]，具备通信、导航、遥感、信息传输、汇聚与分发能力，同时利用地面信息港实现信息综合处理，具有较强的技术前瞻性。

亚太卫星宽带通信（深圳）有限公司冯建元研究团队基于各类卫星网络的深度融合发展需求，提出了天地一体化信息网络中天基卫星网络架构设计^[4]，通过将电磁涡旋、卫星灵活载荷、边缘计算等技术引入卫星网络中，解决新架构下卫星节点间组网难题。

2 低轨巨型星座体系架构设计

2.1 组网体系架构

为了实现低轨巨型星座的高效组网与动态管控，本文提出基于“感知平面-数据平面-控制平面-智能管理平面”4面以及“资源层-传送层-业务层”3层的多层多域混合式智能协同组网体系架构，如图1所示。该架构中，空间激光通信技术为低轨星座大容量数据传输奠定了物理层基础；在轨边缘计算处理能力不断提升使得卫星在轨数据处理、星载多源信息融合逐渐成为现实；巨型星座固有的海量节点和动态链路也对网络感知、自主任务、自主诊断与故障响应等星座自动化管理提出了更高的要求。

针对低轨巨型星座星地融合网络中时空大尺度下的异质网络节点，以及多源多维多域信息所带来的复杂网络结构，该架构拟从逻辑、功能以及任务上对星地融合网络进行解耦，通过引入软件定义网络数（数据平面）控（控制

平面)分离的思想。将网络架构划分为数据平面和控制平面,通过数据与控制相解耦,实现控制集中化,进一步利用网络功能虚拟化解决多维异构基础设施带来的资源管理难题,支持全局、宏观的网络资源调度以及敏捷、灵活、按需的网络重构。结合人工智能技术对网络管控、运维等带来的机遇,引入感知平面和智能管理平面,感知平面对底层数据平面的网络资源状态进行感知,并在智能管理平面进行学习、推理,最终生成面向业务需求的控制策略,从而形成“感知-学习-决策”闭环的网络智能管控机制。智能管理平面则利用丰富的算力资源,部署不同规模和形式的智能训练、推理引擎,对感知数据进行分析,实现业务意图和网络资源状态的分析、预测与匹配,形成控制平面可执行的智能控制策略。控制平面是智能控制策略的具体执行者,通过标准的接口将相应的动作决策下发至数据平面,支持策略的实时精准下发。

感知平面通过对网络状态信息以及数据流信息进行分析、挖掘、预测,实现对网络态势的感知。在现有网络中,大部分网元节点并不具备可编程能力,其感知规则已被嵌入设备,只能对网络状态信息和数据流信息进行被动测量,通过自发地测量规则或接收来自感知平面发布的感知指令,流经网元节点的网络状态、流量特征和性能参数将被测量后上报给感知平面。对于具备一定编程以及计算能力的网元节点,采用主动测量的方式能更加灵活准确地获取网络状态信息和数据流信息,在主动测量中,网元节点通过向网络中主动发送探测数据包,并根据其受网络影响而发生的特性变化来分析网络行为。

数据平面主要负责网络中数据包的转发、处理等,是星地融合网络的基础。其基于软件定义网络的架构,构建星地融合网络数据平面。在数据平面,网元仅负责数据包的转发、处理等,而不需要上层网络控制功能进行嵌入,其控制规则是由控制平面通过如 OpenFlow 等南向接口发布的。网元根据控制平面发布的控制规则,对收到的数据包进行转发、处理等操作。

控制平面连接智能管理平面与数据平面,主要功能是将智能管理平面的控制决策映射至数据平面,通过南向接口,控制平面将智能管理平面得到的控制策略进行下发,实现对星地融合网络的全局控制。针对星地融合网络的多层多域特性,采用集中式与分布式混合控制架构,根据时空分布和网元功能对网络进行分域分层。多层多域混合式网络控制体系是由域间控制系统、域内控制系统以及网络终端节点构成的分层式架构。域内控制系统包括天基控制器、地基控制器等,负责对所辖区域的网元节点进行控制

管理。域间控制系统由多个主控制器构成,负责对域内控制系统进行控制管理,实现星地融合网络的跨域协同。

智能管理平面的功能是基于星地融合网络全局态势图以及相应的业务需求,生成全局最优控制策略。智能管理平面将感知平面收集的网络状态信息以及数据流信息等网络态势信息进行汇聚、存储、管理,从中提取出网络态势,构建星地融合网络全局态势图,从多个维度对网络态势进行全息表征以支撑网络上层平面的控制、管理、优化等功能。

2.2 星地一体化网络分层管控架构

在基于网络虚拟化实现异构网络设备资源池化的基础上,网络分层管控架构采用软件定义网络设计星地融合网络的组网控制机制。星地融合网络的空间段是由分布在不同轨道上的卫星组成的,其网络节点的空间位置不固定,星间链路持续性动态切换,导致天基网络拓扑大范围、持续性动态变化,显著增加了星地融合网络自主管控的难度。一方面,在大时空尺度下,传统软件定义网络集中管控部署困难,难以保障业务的实时响应,需从管控灵活性、实时性等角度设计合理的管控架构^[10];另一方面,与地面网络相比,星地融合网络业务类型更加多元,业务处理需求多样化,控制平面需要具备资源按需动态管控能力,从而能够根据用户和业务的服务要求进行资源的按需匹配。然而,天基网络资源时变特性增加了资源自动化管理与编排的难度。

基于星地融合网络具有的高度复杂性、异构性和动态特性等特点,本文提出基于地面管控层和空间管控层的星地一体化分层分域网络智能控制架构,实现对全局网络的层次化分布式控制。根据网络的时空分布特性,在地面管控层、空间管控层划分相应的网络自主管理区域,构建域内控制系统,对全局网络进行分域控制。

低轨星座网络星地一体化分层管控架构示意如图2所示。

(1) 地面管控层

地面管控层是整个网络系统的业务中心和总控制中心。地面总控制中心对整个网络管理与控制具有最高优先权,是异构网络管理的控制核心。其中,网络运行控制中心负责星地融合网络应用、任务管理、资源宏观调控、状态分析与辅助决策等功能;网络管理与控制中心负责网络资源的实时动态按需分配与监视、用户管理等功能。另外,地面管控层的主控制器可以提供跨域网络信息访问服务,对各域内网络进行集中式管控与跨域协同。针对多域网络异构特性,为智能管理平面汇聚全局网络状态信息,实现星地融合网络全局智能控制,需要建立网络状态信息统一

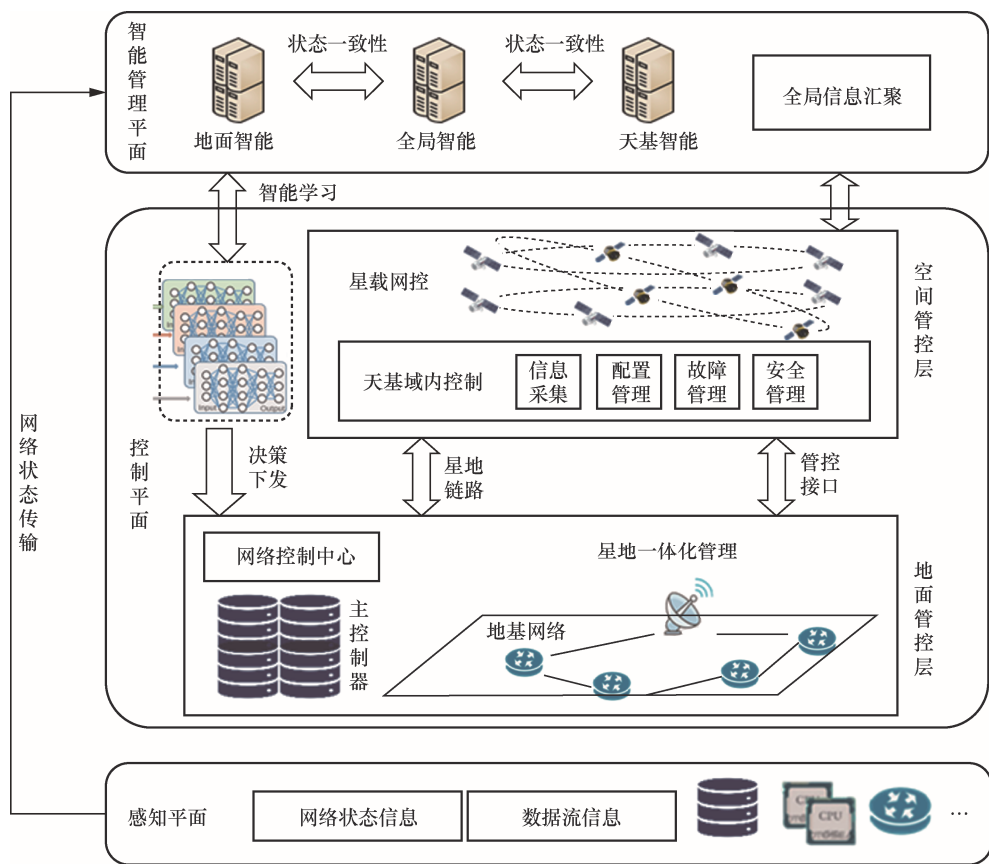


图 2 低轨星座网络星地一体化分层次管控架构示意

描述方法,并采用分布式一致性算法进行地面控制器和空间控制器的网络状态信息同步。

(2) 空间管控层

空间管控层(星载网络管理控制中心)与地面管控层建立有效而可靠的连接,接受来自地面管控层的指令与控制,可通过数据接口和交互协议与星上其他设备(如星载路由交换载荷等)进行数据交换,负责采集上述设备的有关参数以及通过星务管理获取其他卫星设备信息。同时该层负责根据管理计划控制星载设备以实现对空间网络的性能管理、配置管理、故障管理以及相应的安全管理,并根据网络管理协议对数据进行打包加密发送。

针对星地融合网络中复杂的协同关系,构建感知、学习、交互、决策、控制为一体的统一智能组网框架,智能管理平面基于感知平面的网络测量技术获取网络状态信息并进行汇聚,与网络环境的交互中学习最优控制决策,并通过控制平面将决策映射至数据平面,实现星地融合网络的智能控制闭环。基于分层分域网络智能控制架构,探索地面管控层与空间管控层之间的集中式与分布式协作机制。在智能管理平面,从多智能体协作决策角度出发,基于全局网络状态信息汇

聚,星地融合网络控制策略优化问题可以被建模为完全观测的多智能体马尔可夫决策过程,智能体之间的状态交互没有信息损失,因此能获取收敛到全局最优的网络控制策略。

2.3 技术参考模型与协议体系

根据低轨巨型星座的组网体系“三层四面”构建思路,本文对各层、各面的具体技术进一步分解,如图 3 所示。

资源层通过整合星座网络各类卫星节点、地面终端节点等基础资源,实现网络化的信息收集、存储、处理、传输、共享、分发、管理等功能,为星座网络运行提供基础支撑。其主要包括卫星平台资源、波束资源、频段资源、轨位资源,卫星节点计算存储资源、星间链路资源和搭载系统载荷的其他卫星资源等。这些资源共同组成了星座网络的节点资源和网络资源池,通过资源服务接口为传送层提供底层服务保障。

传送层通过组织调度各类底层网络、节点资源,提供动态、弹性、按需分配的传送服务保障能力,主要包括路由解析、链路控制、指令转发、调度执行、数据计算、数据存储、数据传输。传送层通过应用服务接口为业务层提供统一的网络传输与计算存储保障。

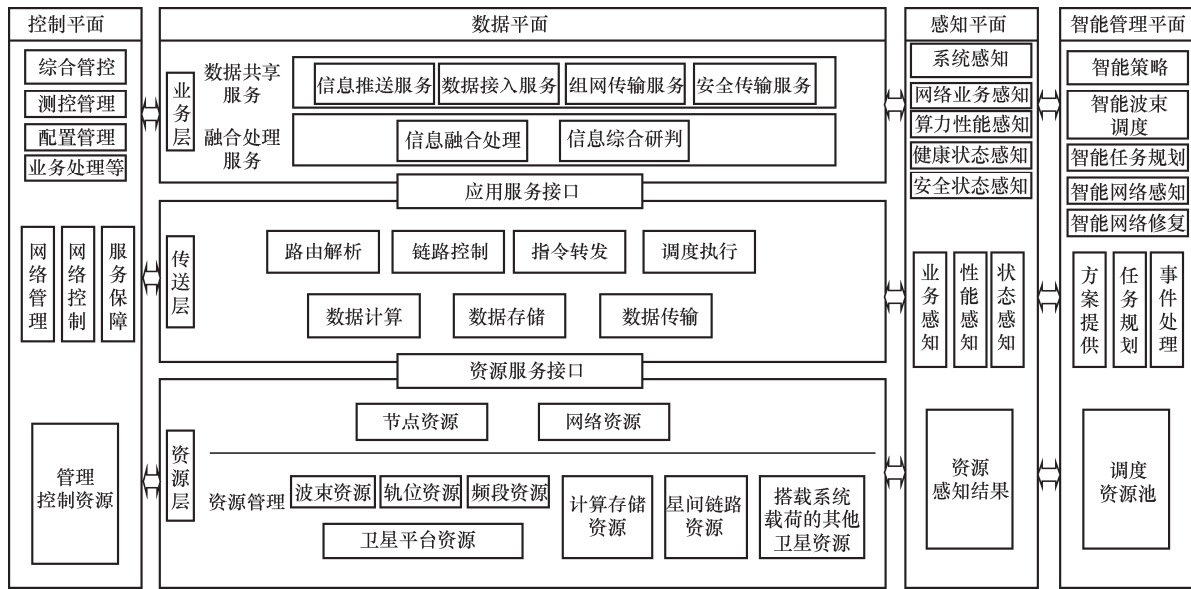


图3 网络技术参考模型

业务层指的是低轨大规模卫星星座为用户提供的各类业务服务，包括信息推送服务、数据接入服务、组网传输服务、安全传输服务等数据共享类服务，也包括信息融合处理、信息综合研判等融合处理类服务。

感知平面主要功能是根据系统资源和数据对系统的业务、性能、状态进行感知，为其他平面提供输入，具体感知方面包括网络业务感知、算力性能感知和健康状态感知、安全状态感知几个方面。在网络业务感知功能中，感知平面需要对系统内的用户业务（包括通信业务和网络业务）进行分类；在算力性能感知功能中，感知平面需要依托资源层的输入（资源感知结果），对系统的算力、通信等性能进行定量评估；在系统健康、安全状态感知功能中，感知平面需要结合资源感知的结果对系统的健康、安全等状态做出综合判断。感知平面作为数据平面的第一道出口，将各类数据转化成感知结果提供给智能管理平面进行决策。

智能管理平面的主要功能是根据感知平面的输入，对系统的各类资源进行智能调度，主要功能包含方案提供、任务规划和事件处理等。在方案提供功能中，智能管理平面需要根据网络业务感知结果和系统算力性能感知结果使用智能算法，提供对系统资源的调度方案，包含智能波束调度、智能任务规划等。在事件处理功能中，智能管理平面需要根据状态感知结果对系统遇到的健康、安全等事件进行处理，输出解决方案，建立对应事件的策略库。智能管理平面输出的解决方案将由控制平面执行。

控制平面的主要功能是将智能管理平面输出的解决

方案和自身产生的一些基本方案转化为控制决策映射至数据平面。通过南向接口，控制平面将控制决策进行下发，实现对网络的全局控制。其按照“分级控制、跨域联合”思路，从资源管理和业务管理两个方面，提供网络/节点/用户管理、测控管理、配置管理、入/退网管理、认证/鉴权/授权、呼叫业务处理、会话业务处理等一体化、多层次系统资源集成管控。具体来说，感知平面将感知到的用户需求上注；星座网络基于协同传感规则，在智能管理平面根据用户需求进行总体任务规划；调配卫星资源，生成对应调度策略，传送到控制平面；控制平面根据调度策略生成卫星任务指令，传送到数据平面执行。

根据低轨大规模卫星星座组网体系架构设计，结合国内外现有标准情况的调研分析，本文对大规模卫星星座的协议标准体系进行了初步梳理，如图4所示。

3 低轨巨型星座关键技术分析

低轨巨型星座发展迅猛，相比于传统数百颗卫星组成的卫星星座，其论证、建设、运营等均具有极强的技术挑战，并且卫星数量激增也给网络管控、网络安全等带来新的要求。由于低轨巨型星座涉及的关键技术诸多，这里仅从星地融合组网体系架构、编址路由与网络鲁棒性敏捷保障、差异化业务承载与端到端可靠传送、体系建模仿真等4个方面进行阐述。

（1）星地融合组网体系架构设计技术

在低轨巨型星座组网体系架构设计方面，一是要满足未来6G愿景下全球全域覆盖的应用目标，与地面网络进

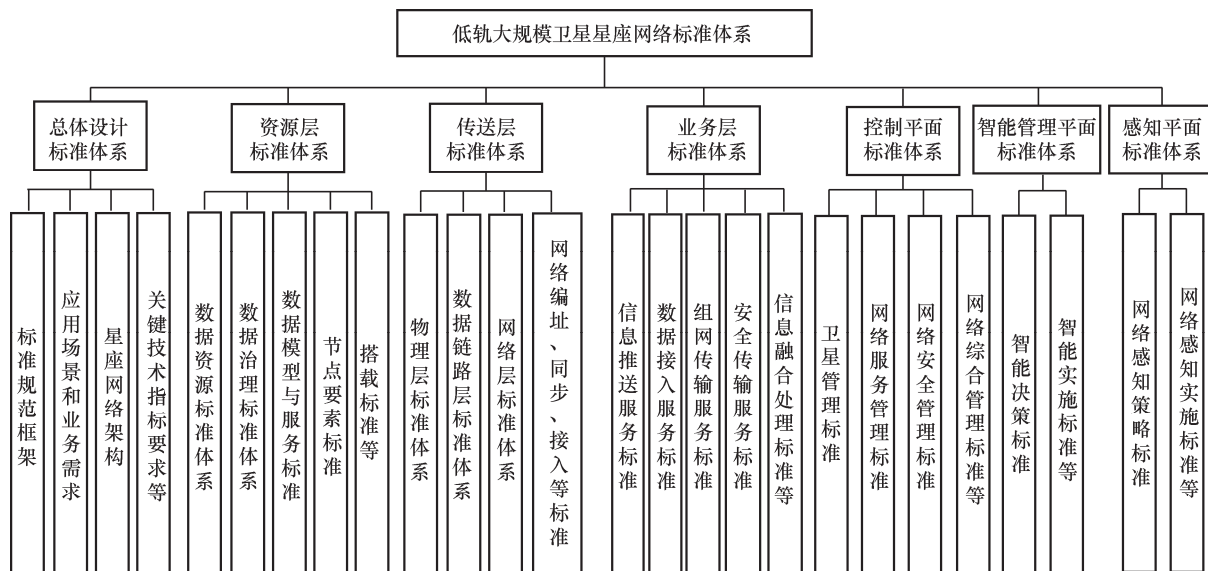


图 4 低轨星座网络协议标准体系

一步深度融合，支持星间、星地、地面等跨层、跨域、跨链路传输选择，支持天地一体化数据交互与信息处理融合^[15]；二是要探索大规模复杂卫星星座构型与高动态星间、星地拓扑约束下的组网难题，提出和完善相关基础理论^[16]，指导星座网络工程建设^[17-18]；三是注重前沿与颠覆性技术应用，特别是人工智能技术、大数据技术、新型网络技术^[19]等应用，实现星座网络自主化、智能化发展^[20]。

（2）编址路由与网络鲁棒性敏捷保障技术

低轨巨型星座需要开展基于多维时空信息的高效编址技术攻关^[21]，研究分层、分域、分区的高效协同组网路由技术，支持多种星座构型下星座网络快速路由收敛^[22]；当网络发生节点、链路等故障时，需要研究时空大尺度下的网络态势感知故障精准定位技术，通过星载轻量化最优备份路由快速计算，实现网络鲁棒性敏捷保障^[23]。

（3）差异化业务承载与端到端可靠传送

低轨巨型星座需要研究在星间/星地异构链路约束下如何实现差异化业务高效承载，支持无线接入网与空间承载网的联合 QoS 保障优化^[24]，支持面向多用户、多业务、多接入、多子网、多协议的端到端资源按需调度；面向网络拓扑动态变化以及流量拥塞等情况，需要研究基于流量感知与时延智能预测的时延抖动精准控制技术，实现时延敏感业务确定性传输，支持时空大尺度下数据的高速端到端可靠传送^[25]。

（4）低轨巨型星座体系建模、仿真技术

当前针对低轨星座网络建模与仿真的研究较多，主要

有基于统一建模语言（UML）的体系结构建模方法、面向服务的体系结构建模方法等。前者属于面向对象的分析方法，将体系结构设计分为分析、综合和评估等若干阶段；后者属于基于活动的设计方法，通过对体系结构实体对象进行研究，提出体系结构要素、产品描述与分析方法^[26]。除了上述方法外，对于低轨巨型星座还需要考虑动态性带来的影响，包括卫星节点动态性、星间/星地链路动态性、业务分布动态性等，特别是网络中节点故障和链路损坏都会给体系能力造成较大影响，针对此类的体系仿真技术研究亟待加强。

参考文献：

- [1] 吴燕生. 以科技自立自强推动航天强国建设[J]. 红旗文稿, 2022(24): 4-8.
WU Y S. Promoting the construction of a space power by self-reliance and self-improvement through science and technology[J]. Red Flag Manuscript, 2022(24): 4-8.
- [2] 张广娜, 刘旭光, 骆华东, 等. “星链”计划在俄乌军事冲突中的应用与启示[J]. 通信技术, 2023, 56(4): 476-482.
ZHANG G N, LIU X G, LUO H D, et al. The application and enlightenment of starlink in russia-ukraine military conflict[J]. Communications Technology, 2023, 56(4): 476-482.
- [3] 王学宇, 武坦然. OneWeb 低轨道卫星系统及其军事应用分析[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(4): 59-64.
WANG X Y, WU T R. Analysis on OneWeb LEO satellite system and its military application[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022,

- 38(4): 59-64.
- [4] 任远楨, 金胜, 鲁耀兵, 等. 美国国防太空体系架构发展浅析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(6): 9-17.
REN Y Z, JIN S, LU Y B, et al. Analysis of American national defense space architecture development[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(6): 9-17.
- [5] 赵军锁. “天智一号” 软件定义卫星[J]. 科技成果管理与研究, 2019(2): 12.
ZHAO J S. “Tianzhi-1” software-defined satellite[J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements, 2019(2): 12.
- [6] 汪定, 陈晓峰, 马建峰, 等. MIT Technology Review 2020 年“十大突破性技术” 解读[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 250-265.
WANG D, CHEN X F, MA J F. Interpretation of 2020 MIT technology review's top 10 breakthrough technologies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 250-265.
- [7] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 177-189.
- [8] 龚宇鹏. 低轨巨型星座构型设计及覆盖分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
GONG Y P. Research on configuration design and coverage performance analysis of LEO mega-constellation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [9] 刘帅军, 徐帆江. Starlink VLEO 星座构型与低轨空间可容纳卫星数目分析[J]. 太空与网络, 2022.
LIU S J, XU F J. Nalysis of Starlink VLEO constellation configuration and the number of satellites in low orbit space[J]. Space and Network, 2022.
- [10] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2024, 35(1): 266-287.
JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. Journal of Software, 2024, 35(1): 266-287.
- [11] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396-406.
WANG N Y, CHEN D, LIU L, et al. Development trend and architecture prospect of future low-earth-orbit information networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 396-406.
- [12] 张婷婷, 武楠, 姚海鹏. 天地融合网络智能组网体系架构研究[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 46-55.
ZHANG T T, WU N, YAO H P. Research on intelligent networking architecture for the integrated space-terrestrial networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 46-55.
- [13] 郑作亚, 薛庆昊, 仇林遥, 等. 基于网络信息体系思维的天地一体通导遥融合应用探讨[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 709-714.
ZHENG Z Y, XUE Q H, QIU L Y, et al. Discussion on integration application of communication navigation remote-sensing with the idea of network information system of system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(8): 709-714.
- [14] 冯建元, 李杰, 庞立新, 等. 天地一体化信息网络中天基卫星网络架构设计[J]. 电讯技术, 2019, 59(7): 775-779.
FENG J Y, LI J, PANG L X, et al. Architecture design of satellite networks in integrated terrestrial-satellite network[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(7): 775-779.
- [15] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
- [16] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 711-715.
- [17] 杨华果, 陈全, 杨自鹏, 等. 低轨巨型星座网络容量评估与分析[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(6): 24-30.
YANG H G, CHEN Q, YANG Z P, et al. Capacity evaluation and analysis of LEO mega-constellation network[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(6): 24-30.
- [18] 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.
- [19] GARDIKIS G, COSTICOLOU S, KOUMARAS H, et al. NFV applicability and use cases in satellite networks[C]//Proceedings of the 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 47-51.
- [20] 姜宁, 章川扬之, 亢晨宇, 等. 基于通信感知计算融合的低轨卫星网络体系架构与关键技术[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 842-852.
JIANG N, ZHANG C Y Z, KANG C Y, et al. Low earth orbit satellite network based on communication, sensing and computing inte-

- gration: architecture and key technologies[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 842-852.
- [21] 陈天骄, 刘江, 丁睿, 等. 基于星地解耦的低轨卫星网络编址和路由策略[J]. 信息通信技术, 2019, 13(6): 65-71.
CHEN T J, LIU J, DING R, et al. Addressing and routing strategy in LEO satellite network based on spaceground decoupling[J]. Information and Communications Technologies, 2019, 13(6): 65-71.
- [22] 汪昊, 冉泳屹, 赵雷, 等. 基于深度图强化学习的低轨卫星网络动态路由算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 596-605.
WANG H, RAN Y Y, ZHAO L, et al. Dynamic routing algorithm for LEO satellite networks based on deep graph reinforcement learning[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023, 35(4): 596-605.
- [23] XING Z Y, QI H, DI X Q, et al. A multipath routing algorithm for satellite networks based on service demand and traffic awareness[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(6): 844-859.
- [24] 史栋元, 王丽娜. 一种用于天基低轨卫星网络边缘计算的GA-DDPG 卸载算法[J]. 工程科学学报, 2024, 46(2): 343-353.
SHI D Y, WANG L N. GA-DDPG unloading algorithm for edge computing in space-based LEO satellite networks[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(2): 343-353.
- [25] 焦媛媛, 田丰, 石神, 等. 基于多径的低轨卫星网络路由拥塞控制策略[J]. 电子设计工程, 2018, 26(18): 113-117.
JIAO Y Y, TIAN F, SHI S, et al. Multipath routing based congestion control strategy for LEO satellite networks[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(18): 113-117.
- [26] 熊伟. 空间信息系统建模仿真与评估技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
XIONG W. Modeling, simulation and evaluation technology of spatial information system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.

[作者简介]



高梓贺 (1983—), 男, 博士, 中国空间技术研究院研究员, 主要研究方向为空间网络、宽带卫星通信、卫星自组网等。

姚海鹏 (1983—), 男, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为星地融合网络、未来网络体系架构、智能组网技术等。

张磊 (1987—), 男, 硕士, 中国空间技术研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统研发。

石钰林 (1996—), 男, 硕士, 中国空间技术研究院工程师, 主要研究方向为星座组网技术、卫星通信、空间体系效能评估等。

王富 (1993—), 男, 北京邮电大学副研究员, 主要研究方向包括光交换网络、光接入、星地融合网络等。

陶滢 (1974—), 女, 博士, 中国空间技术研究院研究员, 主要研究方向为卫星通信、天基信息网络等。