



专题：低空智能网与低空安全

低轨卫星辅助的低空智能网架构分析及设计

武燕燕, 吴松

(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 低轨卫星 (low earth orbit satellite, LEO) 与低空智能网 (low-altitude intelligent network, LAIN) 在覆盖范围、资源分配及网络调度等方面的深度协同, 可显著提升低空网络的整体性能。基于 LEO 辅助的 LAIN (LEO-assisted LAIN, LEO-LAIN) 正逐步成为未来通信与智能化发展的重要方向。聚焦于两者融合的长远目标, 系统性地梳理了 LAIN 技术的研究现状与面临的挑战, 剖析了 LEO-LAIN 智能协同架构的能力体系, 提出了一种 LEO-LAIN 智能协同新型架构。最后, 就 LEO-LAIN 的广阔发展前景进行了展望。

关键词: 低轨卫星; 低空智能网; 智能协同架构

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025039

Architecture analysis and design for low earth orbit satellite-assisted low-altitude intelligent network

WU Yanyan, WU Song

China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: The deep collaboration between low earth orbit satellite (LEO) and low-altitude intelligent network (LAIN) in areas such as coverage, resource allocation, and network scheduling can significantly enhance the overall performance of low-altitude networks. LEO-assisted LAIN (LEO-LAIN) is gradually becoming an important direction for future advancements in communication and intelligent development. Focusing on the long-term goal of integrating the two, the current research status and challenges of LAIN technology were systematically sorted out, and the capability system of LEO-LAIN intelligent cooperative architecture was analyzed. A new LEO-LAIN intelligent cooperative architecture was proposed. Finally, the broad development prospects of LEO-LAIN were prospected.

Key words: LEO, LAIN, intelligent cooperative architecture

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-02-18

基金项目: 国家科技重大专项 (No.2024ZD1300100)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2024ZD1300100)



0 引言

低空物联网 (low-altitude intelligent network, LAIN) 是低空经济发展的基础设施, 其通信需求包括广域覆盖、高可靠性和低时延等。目前, LAIN 主要依赖 5G 网络。然而, 地面网络在偏远地区或特殊环境 (如山区、海洋、极地等) 下的覆盖能力有限, 难以满足低空飞行器在这些区域的通信需求^[1]。在偏远地区或特殊环境下建设地面通信网络需要投入大量资金和资源, 且维护成本高昂。并且, 地面网络可能受到自然灾害 (如地震、洪水)、人为破坏 (如战争、恐怖袭击) 等因素的影响, 导致通信中断。另外, 对于低空飞行器来说, 无论是飞行控制、航迹规划还是紧急情况下的通信, 都需要低时延的通信支持, 但随着飞行器数量的增加和应用场景的复杂化, 仅依靠 5G 网络已难以满足需求。低轨卫星 (low earth orbit satellite, LEO) 通信具有全球覆盖潜力、较低时延、相对较小的链路损耗及发射灵活等优势。通过多颗卫星组成的星座系统, 可以提供冗余路径, 从而增强通信的连续性和可靠性。由于传输路径较短, 低轨卫星能够满足实时通信需求, 尤其在偏远地区, 其部署和运营成本通常低于传统地面通信基础设施。随着技术进步和规模化应用, 未来低轨卫星通信的成本有望进一步降低。基于上述情况, LEO 与 LAIN 技术的融合成为当前研究的重点之一。LAIN 与 LEO 融合组网, 可扩展其覆盖范围, 弥补地面网络在偏远地区或特殊环境下的覆盖不足, 构建无缝覆盖的海、陆、空一体化通信网络, 实现空天地一体化的通信覆盖^[2], 从而在应急救援、环境监测、物流运输等多个领域实现高效的信息交互和资源调度。这种融合不仅提高了通信的灵活性和可靠性, 还能够降低整体成本。

然而, 由于 LEO 与 LAIN 存在诸多差异, 如何实现两者之间的无缝集成与高效协同, 成为当

前亟待解决的关键技术问题。本文正是基于上述技术挑战与融合需求, 深入探索 LEO 有效辅助 LAIN 的发展路径。在综合分析 LEO 与 LAIN 的技术特性与应用场景的基础上, 本文提出了一种基于 LEO 辅助的 LAIN (LEO-assisted LAIN, LEO-LAIN) 智能协同架构, 有助于实现卫星与 LAIN 之间的高效信息交互与资源协同, 为 LAIN 提供更为稳定、广泛的通信支持。

1 LAIN 技术的研究现状

当前, LAIN 作为城市低空新型基础设施正在快速发展, 并逐渐成为推动低空经济智慧化转型的关键力量。国内三大运营商已经启动了 LAIN 的建设工作, 旨在构建覆盖广泛、技术先进的低空网络体系, 以支撑多样化的低空应用需求^[3]。文献[2]将低空物联网定义为“通、感、导、气、算”五网协作的数字化系统。中国移动提出“通感管导”一体化技术体系^[4]。学术界对 LAIN 的研究涵盖了多个方面, 从频谱认知与决策的云边端融合体系架构^[5]到通感一体技术的发展^[6], 再到 LEO 与 5G 网络的互补协同, 以及 6G 天地一体融合网络^[7-8], 这些探索不仅解决了 LAIN 的技术难题, 也为其未来的发展指明了方向。

LAIN 作为一个涉及多个学科和技术领域的综合系统, 其研究正不断深入和多元化。随着研究的深入和技术的进步, LAIN 将为低空经济带来前所未有的发展机遇, 并对城市管理和公共服务产生深远影响^[9-10]。

2 LEO-LAIN 存在的挑战及解决思路

LEO 与 5G LAIN 在覆盖高度、通信协议、网络拓扑结构等方面存在显著差异, 这些差异使得两者融合中需要对一系列的挑战进行考虑, 包括 LEO-低空链路的接入管理复杂、动态网络拓扑下的路由变化快、跨层资源的分配与协同困难等。

下面将进一步对这些挑战进行阐述。

2.1 LEO-低空链路的接入管理

LEO运行轨道较低,卫星之间的相对位置变化较快,导致星间链路需要不断动态重构。这种动态性带来了空间节点编址方式和交换路由方法的复杂性,使得LEO-低空链路的接入管理变得困难^[11]。LEO的快速移动会导致星地链路中的多普勒频偏问题,这需要在接入管理中进行实时调整以保证通信质量。此外,信号传输过程中可能出现的高误码率也增加了接入管理的复杂性^[12]。LEO网络通常需要支持多种类型的用户终端(如手机、无人机、车载设备等),这些终端的接入需求和性能要求各不相同,例如,手机直连卫星技术需要解决链路预算紧张和信号传输稳定性的问题^[13]。

许多研究者针对上述问题开展了深入研究,主要包括以下方面。(1)智能化接入管理。利用人工智能(artificial intelligence, AI)技术优化接入管理流程,通过智能算法预测和处理链路状态变化,实现更高效的资源调度和故障恢复^[14-15]。(2)标准化与协议设计。制定统一的接入管理标准和协议,提高系统的兼容性和可扩展性。(3)模块化设计。采用模块化架构,将复杂的接入管理功能分解为多个独立模块,便于维护和升级^[16]。(4)信号处理与抗干扰技术。开发新的信号处理技术和抗干扰算法,以应对多普勒频偏和高误码率带来的挑战。(5)新型通信技术应用。探索使用激光链路等新型通信技术来提高链路的稳定性和效率^[11]。与此同时,需要推动LEO与地面网络、5G/6G等其他通信技术的深度融合,构建一体化的接入管理架构,充分发挥各技术的优势,提升网络性能和用户体验。随着LEO星座规模的扩大,还需要充分考虑卫星间的协同工作、资源分配以及故障恢复等问题,以实现高效的卫星资源管理和调度。

2.2 动态网络拓扑下的路由优化

LEO网络通常由数百甚至数千颗卫星组成,这些卫星以极高的速度绕地球运行,导致网络拓扑结构时刻变化。卫星在轨道上的快速移动会导致星间链路和星地链路的频繁切换,从而使得网络拓扑结构快速变化,引发路由重构,这种高动态性不仅增加了链路中断的概率,还对路由算法的可靠性提出了更高的要求^[17-18]。由于LEO网络的特殊性,星间链路和星地链路的传播时延较大,这进一步加剧了网络的动态性。例如,极轨道卫星在运行至地球极地时,会与异轨道卫星间链路断开,导致路径切换时间较长^[19]。LEO的计算和存储能力有限,这使得传统的静态路由算法难以直接应用于LEO网络。因此,需要设计适应性强、开销低的动态路由算法来应对网络拓扑的快速变化。针对上述问题,研究者们展开了广泛的研究,包括通过预测卫星的运动轨迹和网络拓扑变化趋势,提前计算出最优路径,从而减少路由切换的时间和开销。文献[20]利用虚拟拓扑技术或图神经网络等方法,对网络状态进行建模和预测,以提高路由决策的准确性和效率。考虑LEO网络的分布式特性,可以设计分布式路由协议,使每个节点能够自主进行路由决策。此外,结合自适应技术,根据网络负载和资源变化动态调整路由策略,以提高网络的整体性能和稳定性^[21]。文献[22]提出了一种基于优先级的自适应路由策略,该策略通过调整网络拓扑和路由参数,以适应实时流量和非实时流量的需求,从而提高用户的满意度水平和网络的服务质量(quality of service, QoS)。根据不同的业务需求(如实时性、可靠性、带宽等),设计专门的路由算法。文献[18]针对高实时性要求的业务,提出可以采用基于反向探测的动态自适应路由算法(reinforcement learning-based dynamic and adaptive routing algorithm, RDBAR),以快速响应网络变化并保证服务质量。为了应对LEO网络中的资源



受限问题，可以研究高效的数据传输与存储机制。文献[23]通过引入微服务化思想和缓存校准机制，降低路由信息存储与交互的开销。

2.3 跨层资源的分配与协同控制

LEO网络覆盖范围广、移动速度快，其资源（如频谱、带宽、计算能力等）相对有限且分布不均。LEO的节点资源受限，而地面站资源相对充足，但两者之间的协同管理难度较大。此外，LEO通信虽然具有低时延的优势，但其快速移动性使得网络拓扑动态变化，用户设备频繁切换卫星连接，导致通信链路不稳定及网络资源竞争加剧，增加了实时性保障的难度以及资源分配的复杂性^[24]。LEO-LAIN涉及空天地一体化的多域协同管理，包括LEO、地面网络、无人机等多种节点类型。这些节点在资源需求、通信模式、覆盖范围等方面存在显著差异，需要高效的跨层资源管理和协同控制机制^[25]。依赖于单一地面控制平台的传统管理方式，难以适应动态变化的网络环境和多样化的业务需求^[26]。此外，LEO的计算能力有限，无法满足复杂任务的实时处理需求^[18]。为解决上述问题，研究者提出了多种资源调度与优化算法。文献[27]通过AI技术（如深度学习、强化学习）优化资源调度算法，学习预测网络需求变化，提前进

行资源分配和优化，实现动态、自适应的资源分配策略，提高资源分配的灵活性和效率。然而，这些算法在实际应用中仍面临计算复杂度高、适应性差等问题。文献[15]在LEO中引入智能多接入边缘计算网络，支持更复杂的任务处理和实时数据处理。文献[28]提出了一种星地协同的分布式管理模式，将部分控制功能下沉到LEO节点，以减少对地面控制中心的依赖，提高系统的灵活性和响应速度。构建统一的管控平台，有助于实现空天地一体化网络的全局协同管理，结合模块化设计和虚拟化技术，进一步提升网络的可扩展性和灵活性^[29]。

2.4 解决思路

鉴于上述挑战，本文提出了一种LEO-LAIN智能协同架构，其架构如图1所示。该架构涵盖了低轨卫星层、低空节点层以及地面层，且引入了智能协同中心这一核心组件。智能协同中心充分发挥各层级在广域覆盖、实时通信以及局部高精度定位等方面的独特优势，对通信资源、感知资源以及计算资源进行精密而高效的协同调度，从而实现空、天、地三者间的一体化智能互联。关于该架构的具体能力体系与逻辑架构，将在接下来的内容中展开详尽的论述。

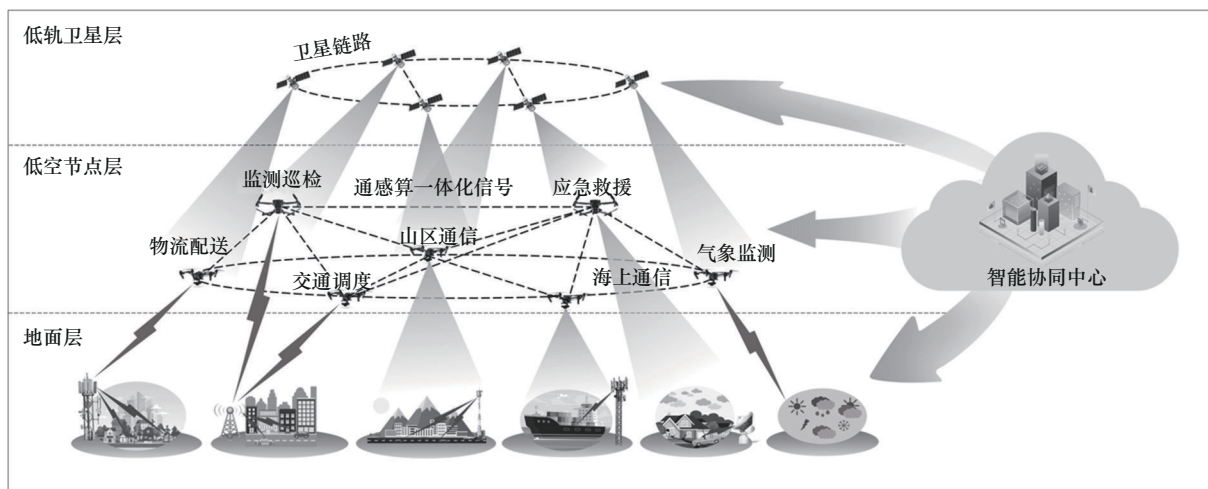


图1 LEO-LAIN智能协同架构

3 LEO-LAIN 智能协同能力体系与逻辑架构

LEO-LAIN 智能协同架构涵盖了广泛的技术领域与应用层面,涉及多个维度的深度整合与创新。LEO-LAIN 智能协同能力体系如图 2 所示。在此架构中,网络层、平台层与应用层紧密协作,共同构筑起集“通信、感知、计算、智能、导航、管理、气象”于一体的综合能力体系。下面将深入剖析这一技术体系,详尽介绍 LEO-LAIN 智能协同架构中各层级的关键能力,并细致阐述其智能协同的逻辑架构。

3.1 网络层关键能力

网络层是 LEO-LAIN 智能协同架构的基础,可分为 LEO-LAIN 通信网、LEO-LAIN 感知网、LEO-LAIN 导航网、LEO-LAIN 气象网以及 LEO-LAIN 算力网。其中,LEO-LAIN 通信网实现空天地协同全覆盖,通过移动性增强策略、智能飞控业务保障、智能集群通信管理等,确保通信网络的稳定性和可靠性。LEO-LAIN 感知网通过通感算智硬件、高精度感知功能、通感协同组网和智能感知测评等,实现对低空环境的全面感知。LEO-LAIN 导航网包括基于卫星的高精度定位和

精准导航、卫星授时时间同步以及时空大数据等部分共同协作,例如,在低空交通系统中,利用 LEO 结合 5G 网络,进行低空无人机、飞行汽车等飞行器的精准定位、导航和感知,同时利用卫星授时技术确保交通信号系统的时间同步,以提高交通效率 and 安全性。此外,还可以利用时空大数据对交通流量进行预测和分析,为城市交通规划和管理提供科学依据。LEO-LAIN 气象网通过多层次分布式观测和多源气象信息融合,实现精细化实时感知体系和智能气象预测,为 LAIN 提供气象保障。LEO-LAIN 算力网支持多种异构数据分析和多层次算力支撑,通过云边端算力融合和智能实时决策,提供强大的计算能力。

3.2 平台层关键能力

平台层是 LEO-LAIN 智能协同架构的支撑层,主要包括数字化空天地底座、智能安全监管、智能化管理、通感算智一体化调度等关键功能。数字化空天地底座通过构建统一的数字化平台,实现空天地一体化的通信和感知。智能安全监管确保通信网络的安全性和可靠性,防止非法接入和数据泄露。通感算智一体化调度能够实现通信和感知的协同调度,提高系统的整体效率。最后,借助智能化的管理服务手段,得以实现对

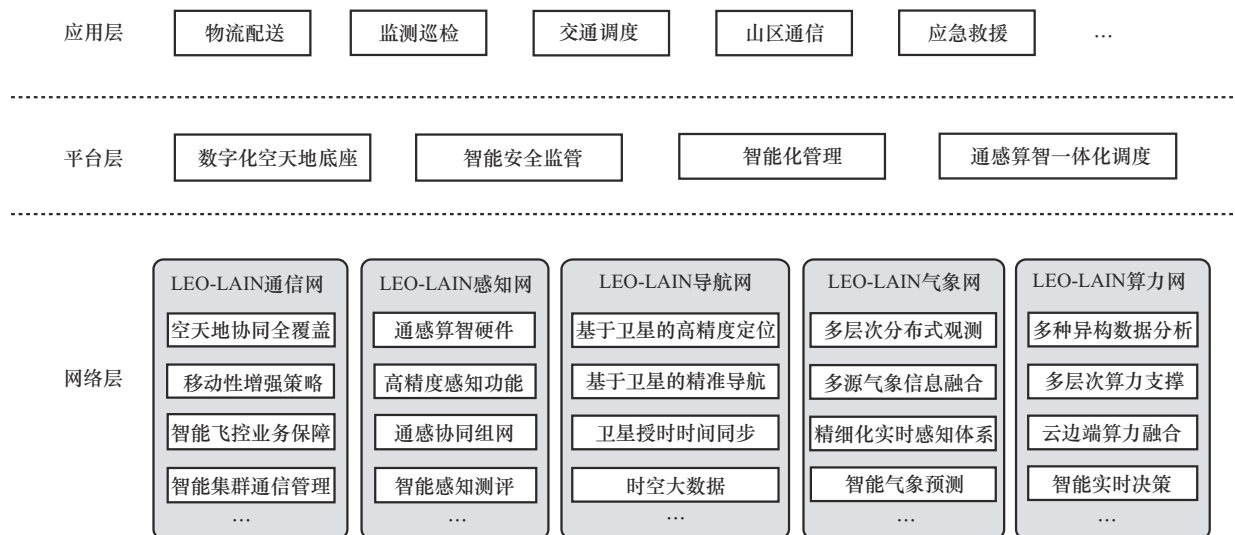


图2 LEO-LAIN 智能协同能力体系



LAIN的全面智能化管理。

3.3 应用层关键能力

应用层是LEO-LAIN智能协同架构的最终目标，通过整合通信、感知、导航等多种功能，为多个行业提供创新解决方案，包括物流配送、监测巡检、交通调度、山区通信、海上通信、应急救援以及气象监测等。LEO-LAIN智能协同架构通过精准的飞行器定位和轨迹追踪，优化物流路径，减少能源消耗，可实现高效、安全的物流配送服务^[2]。LEO-LAIN智能协同架构还可实现对重要设施和区域的实时监测和巡检，如LEO提供的高精度导航服务，支持无人机等飞行器进行周期性和非周期性的巡查任务，确保飞行安全^[2]。LEO-LAIN智能协同架构能够实现智能交通调度，提高交通效率和安全性。它通过提供实时的通信和导航支持，优化航班路径规划，避免空中堵塞，从而提升空中交通运输的整体效率^[30]。此外，LEO-LAIN智能协同架构也能够为地面交通工具提供更为精确的导航服务，从而提升用户体

验。在偏远地区如山区，由于地形限制，地面网络难以覆盖这些区域，而LEO-LAIN智能协同架构能够提供可靠的通信覆盖，确保通信的连续性和稳定性。LEO技术在海上通信中也发挥着重要作用^[31]，能够为渔船、邮轮等海上作业平台提供宽带接入服务，解决海上通信盲区问题，支持海洋经济的发展。在自然灾害等紧急情况下，LEO-LAIN智能协同架构能够实现快速、高效的应急救援。它凭借其大上行数据回传能力和高可靠的控制链路下行能力，支持灾害现场的信息采集和传输，从而提高救援效率^[2]。此外，LEO技术在气象监测中也具有显著优势。它能够提供更高分辨率的气象数据，支持实时气象分析和预测模型的构建，从而提高气象预警的准确性和及时性^[2]。

3.4 LEO-LAIN智能协同逻辑架构

LEO-LAIN智能协同逻辑架构如图3所示，包括“三层一中心”，“三层”分别指低轨卫星层、低空节点层、地面层（各层均具有安全监管能力），以及一个“智能协同中心”。该架构融合

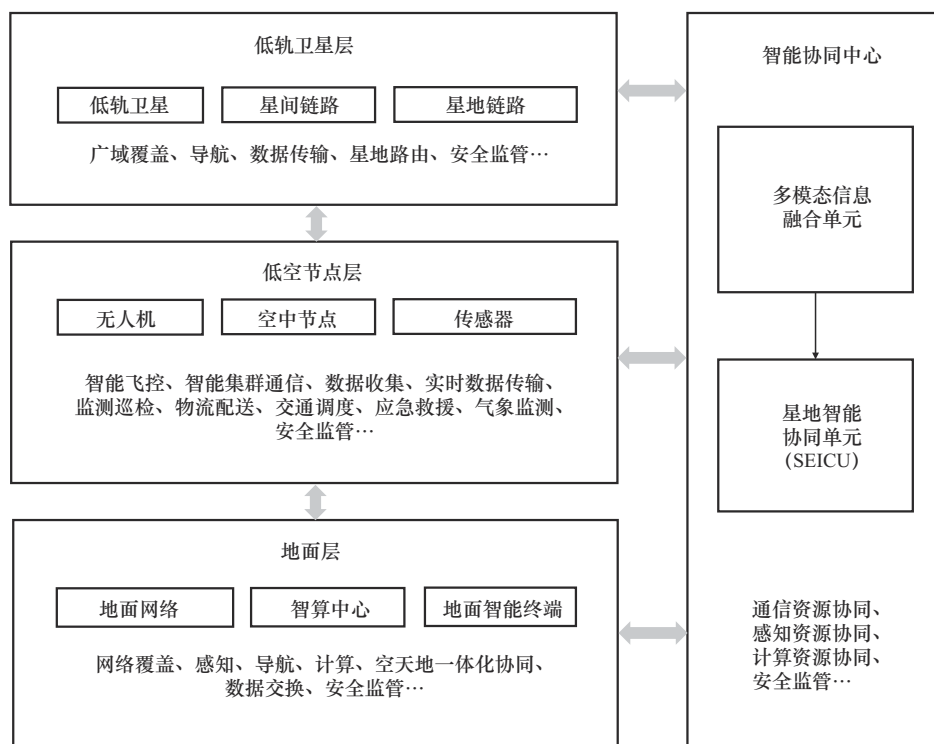


图3 LEO-LAIN智能协同逻辑架构

了LEO的高带宽、低时延特性以及地面网络的灵活性,通过智能协同中心对通信资源、感知资源以及计算资源进行管理和调度,从而充分发挥各层优势,实现各层的高效协作,以支持广泛的低空应用场景^[32]。

智能协同中心包括“多模态信息融合单元”和“星地智能协同单元(satellite-earth intelligent coordination unit, SEICU)”两部分。多模态信息融合单元采用先进的深度学习算法对来自各个传感器的数据进行预处理、特征提取、关联分析等操作,实现从原始数据到有价值信息的转变,以支持更高效的决策和应用服务。SEICU包括如下核心功能。

(1) 路由管理。SEICU通过对整个系统实施全局性的精准调控,确保各层级、各节点的数据能够被智能地转发至最适宜的节点上。

(2) 资源调度与任务分配。SEICU根据任务需求和资源状况,智能调度低轨卫星层、低空节点层以及地面层的通信资源、计算资源和感知资源。SEICU通过优化任务分配,确保各层资源得到充分利用,提高系统的整体效能。例如,SEICU根据低空节点的实际需求,精准地调度低轨卫星层与地面层的各类资源,包括但不限于通信链路、计算资源以及感知资源,以确保低空应用的高效运行。在具体操作中,SEICU运用智能资源调度算法,综合考虑任务需求和当前资源状况,灵活地在地面层与低轨卫星层之间分配计算任务和通信资源。

(3) 集群管理。SEICU作为星地之间的桥梁,不仅负责集群的注册、认证与权限管理,确保集群通信的安全性和合法性,还通过集成的高级调度算法,优化集群内部的通信链路分配,避免通信拥塞,同时根据集群成员的位置和动态需求,智能调整卫星资源分配,实现高效集群通信管理。

(4) 协同控制。SEICU通过实时收集和分析各层的状态信息,实现空天地一体化协同控制。SEICU能够协调LEO、低空节点和地面设备之间的任务执行,通过集成先进的协同算法和模型,实

现各层之间的无缝衔接和高效协作。面向频繁通信场景,SEICU根据实际需求灵活调度资源,传输任务数据、状态信息及紧急指令,确保稳定可靠的通信环境。此外,SEICU实时收集并处理来自低空节点层、低轨卫星层以及地面层的各种信息。这些信息经深度挖掘和智能分析后,可为无人机系统的优化调度、任务规划以及故障预测等提供有力支持。在自然灾害、突发事件等应急场景下,SEICU能够迅速调动各层资源,形成一体化的应急响应体系,为救援决策提供关键信息支持。

(5) 状态监控。SEICU监控各层设备的运行状态,及时发现并处理异常情况,确保系统的稳定运行。

低轨卫星层主要具备广域覆盖、导航、数据传输以及星地路由等功能。通过SEICU辅助,低轨卫星层可以实现与其他层的高效协同。

(1) 动态路由优化与切换机制。依托低轨卫星群的快速移动特性和精确的卫星轨道预测算法,结合星地网络的覆盖情况,低轨卫星层能够智能地调整卫星间的路由路径,支持星间、星地无缝切换,确保低空用户(例如无人机、飞行器)在跨越不同卫星覆盖区域时,通信连接不会中断,从而大幅减少了通信中断时间。低轨卫星层可在SEICU辅助下实现自适应波束成形,根据用户位置的实时变化,动态调整卫星天线的波束方向,从而增强信号强度和稳定性,进一步提升通信质量。

(2) 多路径传输与冗余设计。多路径传输指利用不同卫星或卫星与地面站之间的多条链路进行数据传输,不仅提高了数据传输的可靠性和容错性,还使得低轨卫星层在面对单点故障或信号受阻时,能够迅速调整传输路径,确保通信的连续性。冗余设计指基于SEICU实现冗余卫星覆盖策略,为低轨卫星层提供额外的保障,确保在特定卫星出现故障时,其他卫星能够迅速接管,维持通信服务的稳定。

低空节点层作为数据采集、传输与应用的核



心层,主要由无人机、空中节点以及传感器等构成,承载传统监测巡检、物流配送、气象监测等任务。此外,在SEICU资源调度与任务分配、集群管理、协同控制等功能的辅助下,低空节点层实现了智能飞控业务保障、智能集群通信以及智能动态组网等功能,显著提升了任务执行效率与安全性。

(1) 智能飞控业务保障。低空节点层借助SEICU实现对飞行状态、气象条件及空中交通状况的实时监控与分析,并能够根据飞行任务的优先级和紧急程度,智能调度通信和计算资源,优化飞行计划。

(2) 智能集群通信。无人机之间通过实时交互信息,形成了点对点、点对多点的集群通信。低空节点层通过集群内高效通信协议及SEICU的协同控制功能,可实现任务协调、路径规划、资源分配等。此外,还可通过优化通信链路和降低通信延迟,提升集群整体的响应速度和灵活性,为大规模无人机或飞行器提供快速、可靠的信息交换服务。

(3) 智能动态自组网。低空节点层支持无人机自组网,实现无人机间的直接通信与信息共享,减少对地面网络的依赖。在应急救援等紧急场景中,自组网可为灾区提供临时互联网接入服务、物资投送或人员搜救等支持。此外,无人机及空中节点还可以作为移动基站,为偏远地区或海上用户提供稳定的互联网连接服务。这种混合架构不仅提升了数据传输的灵活性,还增强了系统的鲁棒性。

地面层主要由地面网络、智算中心以及地面智能终端构成。地面层不仅承担着网络覆盖、感知、导航、计算等基础功能,还致力于实现高效数据交换以及空天地一体化协同等高级功能,为低轨卫星层和低空节点层提供强有力的支撑。

(1) 高效数据交换。SEICU优化卫星通信链路,实现了地面网络与低轨卫星层之间高速、稳

定的数据交换和指令传输。地面层的智算中心可以即时获取来自低轨卫星的遥感数据、环境监测信息等,为决策提供科学依据。地面层的控制指令能够迅速通过地面网络或卫星链路传达给低空节点层的无人机或空中节点,实现远程操控和任务部署。同时,无人机收集的数据也能实时回传至地面层,为后续分析和决策提供基础。

(2) 空天地一体化协同。智能协同中心的多模态信息融合单元将来自地面层、低空节点层以及低轨卫星层的多源信息进行深度整合和分析。这些融合后的信息为地面层的智算中心提供了更加丰富、全面的数据支持,进而为智能决策系统提供更加精准、可靠的输入,助力城市管理、交通调度、环境监测等各项工作的规划与实施。在集群协同作业辅助方面,地面网络为无人机提供实时的地图更新、天气预警等辅助信息,增强无人机的环境适应能力,实现集群协同作业的精准调度。

4 结束语

本文立足LEO-LAIN,提出了一种LEO-LAIN智能协同架构。该架构融合了多层网络,借助SEICU实现高效、灵活、可靠、智能化、安全且可扩展的协同控制,适用于多种场景和需求,为后续的LEO与LAIN深度融合技术研究提供了理论基础与实践方向。LEO-LAIN是一个充满机遇和挑战的领域,未来发展前景广阔,需要不断的技术创新和应用场景的拓展。在技术融合方面,随着5G、物联网、AI等技术的不断发展,LEO-LAIN将实现更深层次的技术融合,提供更丰富、更智能的服务。在应用场景扩展方面,除了现有的物流配送、监测巡检、交通调度等应用场景外,LEO-LAIN还将应用于更多的领域,如农业^[33]等。在国际合作方面,LEO-LAIN智能协同架构具有跨国界的特点,未来将有更多的国际合作项目,推动全球范围内的通信网络建设。在商业化运营方面,随着技术的成熟和应用场景的

扩展, LEO-LAIN将实现商业化运营, 为相关企业提供更多的商业机会^[34]。

参考文献:

- [1] BO Y P, KANG K, LI W B, et al. A low-altitude network base station planning model based on PPO algorithm[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 10th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.
- [2] 广东省通信学会, 中国信息通信研究院, 中国联合网络通信有限公司广东省分公司. 2024年低空智联网发展研究报告[R]. 2024.
Guangdong Institute of Communications, China Academy of Information and Communications Technology, China United Network Communications Corporation Limited Guangdong Branch. Low-altitude intelligent Internet development research report in 2024[R]. 2024.
- [3] 张琪玮. 三大运营商启动低空智联网建设[N]. 中国电子报, 2024-11-15(004).
ZHANG Q W. Three major operators launch low-altitude intelligent networking construction[N]. China Electronic News, 2024-11-15(004).
- [4] 中国移动通信集团有限公司. 低空智联网技术体系白皮书[R]. 2024.
China Mobile Communications Group Co., Ltd. White paper on low-altitude intelligent network technology system[R]. 2024.
- [5] 金婧, 王亚娟, 马良, 等. 面向低空智联的通感一体技术[J]. 信息通信技术与政策, 2024(11): 54-62.
JIN J, WANG Y J, MA L, et al. Integrated sensing and communication for low-altitude network[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2024(11): 54-62.
- [6] 董超, 经宇骞, 屈毓铤, 等. 面向低空智联网频谱认知与决策的云边端融合体系架构[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 1-12.
DONG C, JING Y Q, QU Y B, et al. Cloud-edge-device fusion architecture oriented to spectrum cognition and decision in low altitude intelligence network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 1-12.
- [7] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [8] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.
- [9] 吴启晖, 董超, 贾子晔, 等. 低空智联网组网与控制理论方法[J]. 航空学报, 2024, 45(3): 6-23.
WU Q H, DONG C, JIA Z Y, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(3): 6-23.
- [10] 林丽芸, 孔德智. 关于低空智联网发展的思考[J]. 电子质量, 2024(2): 105-109.
LIN L Y, KONG D Z. Reflections on the development of low-altitude Internet of intelligences[J]. Electronics Quality, 2024(2): 105-109.
- [11] 常呈武, 刘宏阳. 卫星互联网星间激光通信链路传输与路由交换技术研究(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 70-75.
CHANG C W, LIU H Y. Research on inter-satellite laser communication link transmission and routing switching technology of satellite Internet(invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(7): 70-75.
- [12] 张孟扬, 马婷, 刘晓宇, 等. 大规模低轨卫星互联网传输层关键技术研究及展望[J]. 移动通信, 2024, 48(9): 40-49.
ZHANG M Y, MA T, LIU X Y, et al. Research and prospects of key technologies on transport layer for large-scale LEO satellite networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(9): 40-49.
- [13] 杨岭才, 赵冬, 杨虎啸, 等. 再论推进我国卫星互联网建设的策略建议: 基于手机直连卫星技术路线与商业闭环的思考[J]. 电信科学, 2024, 40(10): 134-143.
YANG L C, ZHAO D, YANG H X, et al. Further discussion on strategic suggestions for promoting the construction of China's satellite Internet: Consideration based on the technology route and commercial closed loop of satellite direct connection to mobile phone[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(10): 134-143.
- [14] 申佳伟, 洪涛, 张更新. 低轨卫星网络接入与传输技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 68-74.
SHEN J W, HONG T, ZHANG G X. Access and transmission technology for LEO satellite networks[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(5): 68-74.
- [15] 王鹏, 张佳鑫, 张兴, 等. 低轨卫星智能多接入边缘计算网络: 需求、架构、机遇与挑战[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 35-46.



- WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Low earth orbit satellite intelligent multi-access edge computing networks: requirements, architecture, opportunities and challenges[J]. *Mobile Communications*, 2021, 45(5): 35-46.
- [16] 孙耀华, 彭木根, 赵亚飞, 等. 低轨卫星互联网从星地融合迈向通遥一体化[J]. *北京邮电大学学报*, 2025: 1-27.
- SUN Y H, PENG M G, ZHAO Y F, et al. Low earth orbit satellite network: from satellite-terrestrial convergence to the integration of communication, navigation and sensing[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2025: 1-27.
- [17] 刘恩慧. 低轨星座动态路由算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- LIU E H. Research on dynamic routing algorithm of LEO constellation[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [18] 孙雪. 卫星网络路由与资源优化关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- SUN X. Research on key technologies of satellite network routing and resource optimization[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [19] 王璇, 侯蓉晖, 徐伟琳. 低轨卫星网络动态路径切换技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(2): 80-86, 109.
- WANG X, HOU R H, XU W L. Dynamic path switching technology for LEO satellite networks[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(2): 80-86, 109.
- [20] 汪昊. 基于图神经网络的低轨卫星网络动态路由算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022.
- WANG H. Research on dynamic routing algorithm for LEO satellite networks based on graph neural networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [21] 蒋瑞红, 冯一哲, 孙耀华, 等. 面向低轨卫星网络的组网关键技术综述[J]. *电信科学*, 2023, 39(2): 37-47.
- JIANG R H, FENG Y Z, SUN Y H, et al. A survey on networking key technologies for LEO satellite network[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(2): 37-47.
- [22] 郑爽, 张兴, 王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2022, 3(3): 97-105.
- ZHENG S, ZHANG X, WANG W B. Survey of low earth orbit satellite communication network routing technology[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2022, 3(3): 97-105.
- [23] 曹素芝, 孙雪, 王厚鹏, 等. 星地融合网络智能路由技术综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(2): 11-19.
- CAO S Z, SUN X, WANG H P, et al. Review of intelligent routing technology in integrated satellite-ground network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(2): 11-19.
- [24] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(5): 1177-1214.
- CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2024, 54(5): 1177-1214.
- [25] 贾子晔. 空天一体化网络资源管理方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- JIA Z Y. Research on resource management in space-air integrated networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [26] 陆洲, 田建召, 赵晶, 等. 高低轨混合卫星网络管控架构设计[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(1): 15-19.
- LU Z, TIAN J Z, ZHAO J, et al. A high and low orbit satellite network management architecture[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(1): 15-19.
- [27] 王龙河, 周一青, 曹欢, 等. 卫星互联网资源管控技术研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(6): 27-38.
- WANG L H, ZHOU Y Q, CAO H, et al. Resource management and scheduling for satellite Internet[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(6): 27-38.
- [28] 赵瑜, 李悦, 班亚明, 等. 空间信息网络天基接入网无线资源管理研究[C]//第七届“空间信息网络”学术论坛, 2023: 141-149.
- ZHAO Y, LI Y, BAN Y M, et al. Research of radio resource management of space-based access network in space information networks[C]//The 7th Space Information Networks Symposium, 2023: 141-149.
- [29] 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.
- [30] 魏奥. 低空物联网与低空安全管控研究[J]. *网络安全技术与应用*, 2024(8): 100-102.
- WEI A. Research on low-altitude intelligent network and low-altitude safety control[J]. *Network Security Technology & Application*, 2024(8): 100-102.
- [31] 解宇宇, 汪进, 王慧东, 等. 低轨卫星与5G融合应用及关键技术[J]. *邮电设计技术*, 2021(4): 10-14.
- XIE N Y, WANG J, WANG H D, et al. Application and key technology of LEO and 5G fusion[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2021(4): 10-14.

- [32] 翁玮文, 程锦霞, 刘京, 等. 基于星地协同组网的天地一体关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 3-10.
WENG W W, CHENG J X, LIU J, et al. Key technical research of space-terrestrial integrated network based on satellite-terrestrial collaborative networking[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 3-10.
- [33] KHALIL R A, ALDHAHERI L, ALSHEHHI N, et al. Localization performance analysis in agriculture 4.0 utilizing low earth orbit (LEO) satellites[C]//Proceedings of the 2024 7th International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [34] OH S, KIM J K, SONG C H. Considerations about schemes for commercial/defense joint operation of LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 661-662.

[作者简介]



武燕燕 (1995-), 女, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为空地一体化网络等。



吴松 (1974-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络、星地融合网络等。