

通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术



Communication, Sensing and Computing Integration Empowered LEO Satellite Constellation Networks: Architecture and Key Technologies

窦成龙/DOU Chenglong¹, 吴远/WU Yuan^{1,2},
钱丽萍/QIAN Liping³, Tony Q. S. QUEK⁴

(1. 厦门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 中国 厦门;

2. 珠海澳大科技研究院, 中国 珠海 519301;

3. 浙江工业大学, 中国 杭州 310023;

4. 新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院, 新加坡 487372)

(1. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of

Macau, Macau, China;

2. Zhuhai UM Science and Technology Research Institute, Zhuhai

519301, China;

3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

4. College of Information System Technology and Design, Singapore University of Technology and Design, Singapore 487372)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241013.1141.004.html>

网络出版日期: 2024-10-14

收稿日期: 2024-08-12

摘要: 为了进一步支撑空天地一体化多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算的协同演进, 低轨卫星星座网络亟需发展通信、感知、计算融合 (ISCC) 理论与关键技术。基于此, 首先概述了低轨卫星星座网络的研究背景和通感算融合网络研究现状; 进一步地, 聚焦于通信、感知和计算的深度融合, 深入分析了通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术; 最后探讨了通感算赋能的低轨卫星星座网络面临的未来挑战与发展前景。本研究有望为未来实现空天地一体化的多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算奠定基础。

关键词: 低轨卫星星座网络; 通感算融合; 空天地一体化

Abstract: To further support the synergistic evolution of multi-dimensional collaborative communications, precise remote sensing, and efficient ubiquitous computing for integrated space-air-ground networks, it is imperative to advance the theory and key technologies of integrated sensing, communication, and computing (ISCC) in low earth orbit (LEO) satellite constellation networks. This paper first provides an overview of the research background and status of ISCC in LEO satellite constellation networks. Subsequently, it delves into the architecture and key technologies empowered by ISCC, which facilitates LEO satellite constellation networks. Finally, it explores the future challenges and development prospects of ISCC-empowered LEO satellite constellation networks. This research is expected to lay the foundations for multi-dimensional collaborative communications, precise remote sensing, and efficient ubiquitous computing in integrated space-air-ground networks.

Keywords: low earth orbit satellite constellation network; communication, sensing and computing integration; space-air-ground integration

引用格式: 窦成龙, 吴远, 钱丽萍, 等. 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 9-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405003

Citation: DOU C L, WU Y, QIAN L P, et al. Communication, sensing and computing integration empowered LEO satellite constellation networks: architecture and key technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 9-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405003

1 低轨卫星星座网络概述

1.1 研究背景

在全球化和信息化浪潮的推动下, 通信网络的形态正在经历深刻的变革。尽管传统的地面通信网络在过去的几十年

中取得了长足进步, 但随着全球通信需求的不断增长和各类智能应用的快速涌现, 其在覆盖范围和适应复杂环境方面的局限性也日益凸显。低轨卫星星座网络凭借独特的轨道优势, 以其全域覆盖、超可靠低延迟和具韧性的特点, 被视为实现全球信息一体化的关键范式以及地面网络的有效补充和扩展。作为6G重要技术特征之一的非地面网络 (NTN), 低轨卫星星座网络的发展已经上升到国家战略层面, 成为推动国家数字化转型和提升国际竞争力的重要力量^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62072490、62122069、62071431); 澳门科学技术发展基金项目 (FDCT 0158/2022/A)

低轨卫星星座网络在实现蓬勃发展的同时，也面临着一系列挑战。长期以来，通信、遥感和计算功能卫星被分割在独立的系统中各司其职。然而，随着物联网、人工智能、大数据等新兴技术的不断革新和深度融合，这种传统的功能分离式的低轨卫星星座网络难以满足日益增长的跨领域、多元化的业务需求。卫星轨道资源的有限性，以及与地面网络的协同问题，都制约着低轨卫星星座网络的进一步发展。特别是随着对遥感技术精度要求的不断提升，如何高效传输和处理海量感知数据，成为制约低轨卫星星座网络发展的关键瓶颈^[2-3]。

通感算融合网络是应对上述挑战的一种行之有效的方案。通过通感算融合为低轨卫星星座网络赋能，可以有效缓解轨道资源紧张的问题。通过在低轨卫星星座网络有限的轨道资源内高效集成通信、感知和计算功能，不仅可以极大地提升资源的利用效率，还为网络的综合服务能力提供了强有力的支撑；同时强化了网络的自主性和智能化水平，为未来空地海一体化通信、多星组网遥感和在轨边缘计算等多维功能的协同演进打下了坚实基础^[4-5]。

1.2 主要技术特征

低轨卫星星座网络作为新一代全球通信基础设施的核心，其独特的技术特征赋予了自身在全球信息化时代中的战略地位。面对日益复杂的通信需求和愈发多元的应用场景，低轨卫星星座网络通过创新的技术手段，突破了传统地面网络的诸多局限，展现出卓越的技术优势。以下是低轨卫星星座网络的关键技术特征：

1) 全域覆盖

低轨卫星星座网络通过在近地轨道上部署密集卫星阵列，实现全球范围内的无缝通信覆盖，确保在偏远、极端环境下依然能够提供稳定的通信服务。这种全域覆盖能力不仅为传统地面网络无法覆盖的偏远和海洋区域带来了高效、可靠的信息接入能力，也为全球用户提供了平等的数字服务机会，缩小了信息鸿沟，是全球信息一体化的重要基石。

2) 智简网络

低轨卫星星座网络采用了智能化和自动化的网络架构和运营策略，通过集成先进的机器学习模型与人工智能算法，实现了资源分配和网络调度的自适应优化以及简化的网络管理与配置。智简网络不仅降低了运维的复杂性和成本，还极大地提升了整体网络效率与用户体验。

3) 星地联动

通过与地面通信设施的深度融合，低轨卫星星座网络打造了一个高度协同的星地一体化通信体系。星地联动模式支

持星地分布式学习星地群智式协作，增强了网络的稳健性和可靠性，提升了网络的整体智能性和服务质量。

4) 异构网络协同

低轨卫星星座网络支持多种网络制式和接入技术的协同工作，兼容不同层级网络的异构连接。它能够与其他网络架构，如陆基网络、空基网络、海基网络等，形成高度互补的异构通信系统。异构网络协同使得网络能够在多样化的业务环境中灵活调整，以最佳方式满足不同的业务需求，实现高效的跨域资源共享和负载均衡，构建一个高度灵活和可扩展的通信生态系统。

5) 韧性网络

低轨卫星星座网络通过多路径路由、多卫星冗余设计和分布式架构，具备了强大的抗干扰能力和自组织、自愈功能，使其在面对自然灾害、外部攻击或其他意外情况时，网络能够快速重构并恢复正常服务，展现出卓越的韧性和容错能力，保障了服务的连续性和高可靠性。

1.3 通感算融合网络研究现状

在现有的低轨卫星网络中，通信、感知和计算功能通常是通过不同载荷分离实现的，各自发展形成独立的技术体系。通信功能主要依靠卫星通信链路，通过卫星-地面站或星间链路完成数据传输、语音通话、互联网接入等服务。目前，卫星通信技术已经在全球范围内广泛应用，提供了从宽带互联网到物联网连接的多种服务支持。随着5G技术的发展，基于卫星的非地面网络成为了重要的研究方向，重点在于增强星地协同通信的效率和覆盖范围^[6]。

感知功能通常由遥感卫星承担。这些遥感卫星通过搭载光学、合成孔径雷达等传感器，对地球进行全方位、多频段的观测，获取高分辨率的图像数据及环境信息^[7]。这些数据广泛应用于气象监测、自然资源管理、灾害预警等领域。近年来，随着多光谱、高光谱成像技术的发展，感知技术的精度和范围进一步提升，成为国家和企业获取关键环境数据的重要手段。

在传统低轨卫星网络中，卫星本身的计算能力较为有限，主要负责简单的数据处理和转发任务，复杂的数据分析和计算通常依赖于地面站或云端的计算资源。随着卫星系统规模的扩大和数据量的增加，计算能力的需求也在不断提升，因此，星载计算逐渐成为研究的热点，包括边缘计算、在轨数据处理等新兴领域^[8]。

尽管通信、感知和计算功能在现有卫星网络中分别取得了较大进展，但由于功能的割裂，这些系统在应对复杂和多样化的需求时显得捉襟见肘。尤其是随着物联网、大数据、

人工智能等技术的发展，各种跨领域、实时性要求高的应用场景对网络性能提出了更高的要求^[9-10]。因此，如何将通信、感知、计算功能有效融合，成为当前卫星网络研究的重要方向。

通感算融合网络在国际上已经引起了广泛关注，并逐渐成为新一代卫星网络技术的核心方向。美国和欧洲的多个科研机构和企业，如美国航空航天局（NASA）、欧洲空间局（ESA）、SpaceX、OneWeb等，纷纷投入大量资源研究通感算融合技术，旨在提升卫星网络的整体性能和服务能力。例如，SpaceX的星链计划（Starlink）不仅致力于全球宽带互联网覆盖，还在探索将星载计算和人工智能技术应用于星间通信优化和数据处理。ESA则在多项计划中探讨了通信、感知、计算一体化的可能性，特别是通过人工智能算法优化卫星资源分配和数据处理的效率。

在中国，随着国家对空间信息网络的重视，通感算融合技术也逐渐成为科研机构和企业的研究重点。中国航天科技集团、中国电子科技集团等单位在多个卫星项目中探索了通感算融合技术。近年来，中国高校和科研院所也积极参与其中，进行前沿理论的研究和技术的开发。例如，清华大学、

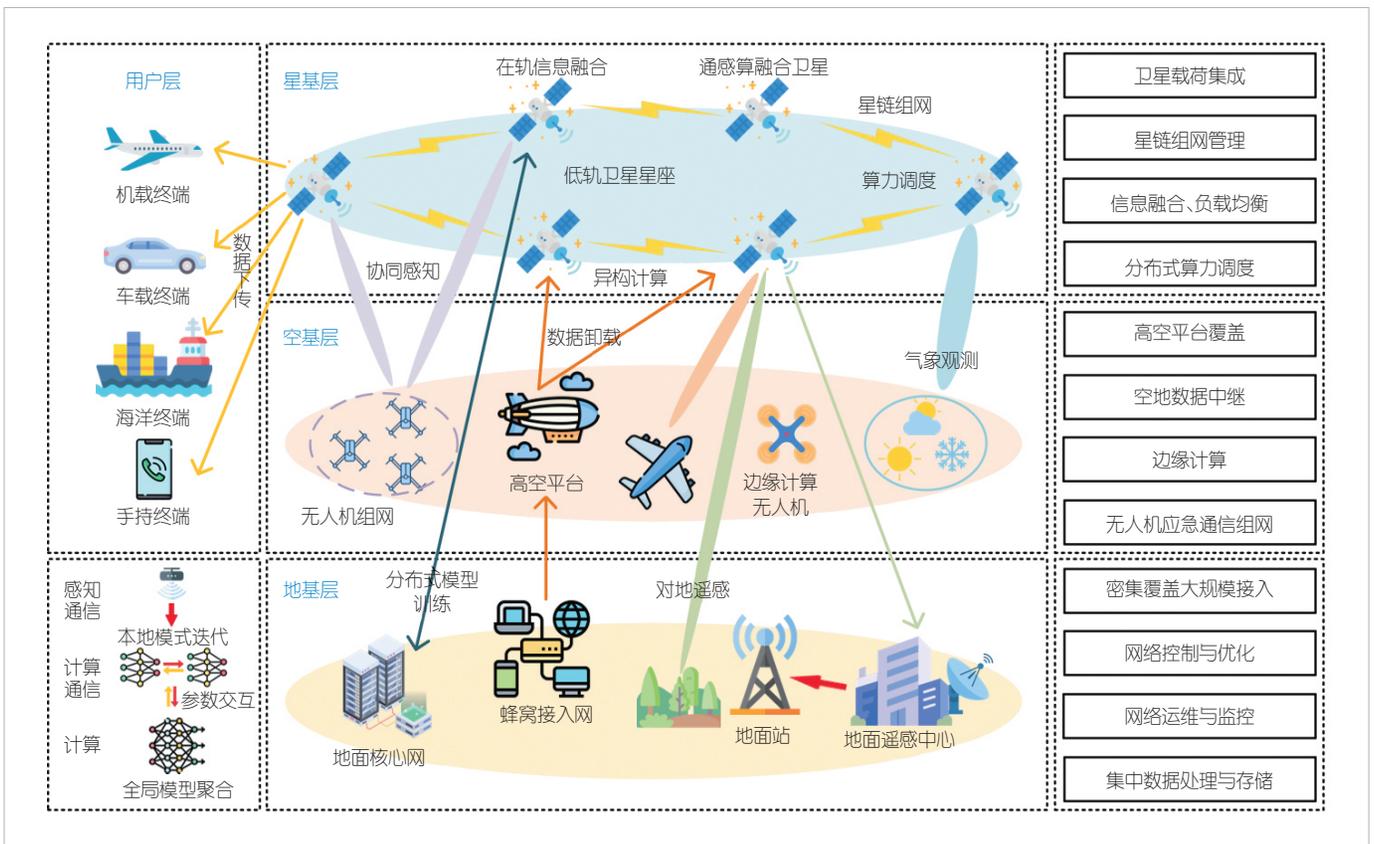
北京邮电大学等高校在通感算一体化的理论研究方面取得了显著进展，提出了多项具有创新性的融合技术方案。此外，国家重点研发计划和自然科学基金等项目也在不断支持通感算融合技术的研究，推动了中国在该领域的快速发展。

整体来看，通感算融合网络的研究已经在全球初步展开，并取得了一定的阶段性成果。尽管如此，当前关于低轨卫星星座网络中通感算融合应用的研究仍处于探索和试验阶段，尚未形成系统的理论框架和全面的技术体系。特别是在网络架构设计、信号处理技术、资源优化配置等方面，仍然缺乏多维度的考量及跨域综合技术解决方案，亟需进一步深入研究和实践验证。受此激励，本文旨在提出通感算融合深度赋能的低轨卫星星座网络架构，并以全局系统性的视角深入分析其关键技术，从而为低轨卫星星座网络乃至整个空间信息网络技术智能化和协同化发展提供全新策略。

2 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络

2.1 网络架构

通感算赋能的低轨卫星星座网络架构如图1所示。在该



▲图1 通感算赋能的低轨卫星星座网络架构

架构中，传统的通信、感知、计算功能不再是彼此独立的模块，而是通过深度融合实现更高效的资源利用与服务能力。这一网络架构的设计主要围绕以下几个核心层次：

1) 星基层

星基层是整个网络的核心，由一组通感算融合低轨卫星组成，它们通过星间链路进行互联，构建出一个高度动态且灵活的星座组网系统。每颗卫星不仅具备强大的通信能力，还集成了感知和计算功能，可实现对地表、海洋、大气等目标的全时域监测和数据处理。

2) 空基层

空基层作为连接星基层与地基层的中间桥梁，主要由无人机、飞艇、高空气球等高空平台构成，其作用在于扩展通信覆盖范围，并为数据传输提供中继服务。空基层不仅能减轻卫星直接与地面站连接的负担，通过信号放大和增强技术提高通信质量，还能够在特定情况下，临时接替失效卫星的功能，确保网络的连续性和稳定性，尤其是在地形复杂或偏远区域。

3) 地基层

地基层由多个地面网络和数据中心构成，负责管理和调度星基层以及空基层的资源，是整个网络架构的支撑和管理中枢。地基层在任务调度与规划、卫星控制与维护方面发挥着关键作用，通过实时监控和调度，确保星座的稳定运行，并对传输的数据进行集中分析处理，提供高质量的服务支持。

4) 用户层

用户层包括各种终端设备，如智能手机、物联网设备、无人机等。用户层通过与地基层或直接与星基层的连接，获取所需的通信、感知和计算服务。用户层在系统中承担着信息采集、任务分发、服务请求等多重功能，并可以根据需求灵活调整与卫星网络的互动模式。同时，用户层还可以向网络反馈使用体验和请求，促进服务的持续优化。

这种多层次化的网络架构不仅可以实现通信、感知、计算的无缝集成，还可以通过不同层次之间的协作与交互，最大化网络的整体效能，为用户提供更加智能化、定制化的服务。

2.2 关键技术

在通感算赋能的低轨卫星星座网络中，网络的高效运作和综合性能提升依赖于多个关键技术的协同作用。这些技术不仅奠定了网络架构的基础，还进一步提升了网络的智能化、动态化和高效化。本文从通信、感知、计算、知能、用控5个方面深入探讨了5项关键技术，分析其具体内容以及

在实际应用中的重要性。

1) 通信：星链均衡动态组网

星链均衡动态组网旨在实现卫星链路的高效管理与动态调整。在通感算融合的背景下，卫星网络不仅需要支持通信，还要兼顾感知与计算功能。这要求网络能够通过感知各卫星节点的通信状态、位置变化和业务负载，动态优化星链拓扑结构和星链资源分配，提高自组织与自愈能力，以确保网络的整体平衡与高效运行。通过引入智能调度算法和先进的链路管理机制，星链均衡动态组网能够在不同的任务场景下灵活调整网络拓扑结构，优化卫星间的通信路径，提升网络的服务质量与韧性。同时，这种动态组网还需结合机器学习和人工智能技术，预测链路变化趋势，提前进行资源调整，以确保网络的持续高效运行。

2) 感知：智能多模态协同感知

随着卫星网络覆盖范围和应用场景的不断扩展，单一的感知模式已无法满足复杂环境和多样化任务的需求。智能多模态协同感知技术旨在通过整合来自不同传感器和感知设备的多种数据类型，如光学图像、雷达信号、红外数据等，实现多模态信息的互补融合与协同处理，从而提升感知的精度和可靠性。这一技术的核心在于利用人工智能和机器学习算法，对多模态数据进行深度分析与交叉验证，提取出更加准确的环境特征和目标信息。同时，智能多模态协同感知还能够在感知过程中的数据冲突或不一致时，选择最优的数据融合策略，确保感知结果的准确性和鲁棒性。这不仅提高了网络的环境感知能力，也为后续的通信与计算任务提供了更精准可靠的数据支持，确保网络在复杂环境下的稳定高效运行。

3) 计算：星载协作异构计算

星载协作异构计算旨在解决有限的计算资源与日益增长的复杂计算需求之间的矛盾。传统的星载计算往往依赖于单一类型的计算资源，难以适应多样化、复杂度高的任务需求。通过引入异构计算技术，可以将不同类型的计算资源，如中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）、现场可编程门阵列（FPGA）等，集成在卫星平台上，协同完成复杂的计算任务，从而大幅提升计算效率和任务处理能力。此外，星载协作异构计算还支持跨卫星协作，通过高速星间链路，多个卫星可以共享计算任务，形成分布式算力网络，进一步提升了整个星座网络的计算能力与容错性。这种协作模式特别适用于处理需要进行大量数据分析的任务，如大规模图像处理、复杂物理模拟、分布式模型训练等，能够显著减轻单颗卫星的计算负载，同时提高任务的完成速度与可靠性。

4) 知能：多维信息在轨融合

多维信息在轨融合旨在通过高效地融合集成的通感算多维跨域信息,使得网络能够提供更为全面和精准的服务。它来自通感算等多个时空尺度获得的多维信息,如数据层信息、特征层信息、决策层信息,在轨道上进行语义级实时融合与处理,形成综合性的智能决策支持。这项技术的核心在于通过大数据技术,对不同来源的信息进行综合分析、知识萃取与数据融合,以提供更加全面和准确的环境感知和情境理解。

5) 用控: 按需分布式算力调度

按需分布式算力调度旨在根据实时需求动态分配和调度分布在低轨卫星星座中的计算资源,确保资源的高效利用和各类任务的顺利执行。网络获取的全面的态势感知数据,如组网状态、运行姿态、任务规划等,为按需分布式算力调度提供了精准的决策依据。该技术通过精准的资源调度和任务分解,最大化利用低轨卫星星座网络中的计算资源,支持复杂任务的并行处理,提升整体网络的服务能力和控制效率,使其能够灵活应对各种场景需求。

2.3 网络性能与服务评价体系

建立一个全面的服务评价体系对于衡量通感算赋能的低轨卫星星座网络性能与服务质量至关重要。该评价体系不仅需要涵盖通信、感知、计算等多维度的指标,还要关注网络的整体协调性和服务能力。从上一小节的5个方面出发,其网络性能与服务评价体系如表1所示。

3 未来挑战与发展前景

随着通感算赋能的不断深化,未来低轨卫星星座网络在迈向多业务承载和泛在智能的愿景的同时,也面临诸多复杂挑战和技术瓶颈。下面我们将从多个关键角度探讨通感算赋能的低轨卫星星座网络面临的未来挑战与发展前景。

1) 通用融合理论基础与一体化信号设计

通感算赋能的低轨卫星星座网络在通用融合理论基础与一体化信号设计方面面临的挑战,主要集中在跨域理论的重

构以及资源有限性与复杂环境下的多功能信号设计。

通用融合理论基础的建立是整个通感算融合网络的核心。然而,通信、感知和计算功能之间存在着不同的物理机制和应用需求,如何在统一的理论框架下将这些功能有机结合,仍然是一个亟待解决的难题。现有的理论模型多是针对地面网络的应用场景设计,且往往侧重于单一功能模块的优化,缺乏对多维功能之间的协同效应的深度理解。在低轨卫星星座网络中,必须考虑高动态、广域覆盖、长时延等空间特有的约束条件,重构符合其特点的通用融合理论基础,以确保通信、感知和计算功能在轨道上能够高效协同。

此外,在一体化信号设计方面,通感算融合要求通信、感知和计算功能的信号能够在共享的资源下高效传输和处理。这涉及跨域信号的统一编码和调制技术,以及多维信号在复杂环境下的抗干扰能力和可靠性问题。在低轨卫星星座网络中,由于卫星的高速移动和频繁的链路切换,加之复杂的多接入星间干扰以及星地干扰,信号的一致性和连续性难以保障。因此,未来需要开发更加灵活、智能的信号处理算法,以应对多维功能的协同需求。同时,随着通信、感知和计算技术的不断演进,信号设计还需要考虑未来的技术发展趋势,如量子通信、大规模多输入多输出(MIMO)、智能反射面等新兴技术带来的复杂性,确保在未来复杂多变的技术环境中依然具有强大的适应性和竞争力。

2) 服务分布不均与服务连续性

低轨卫星星座网络凭借其全域覆盖能力,能够为全球用户提供通信、感知和计算服务。然而,由于其轨道分布特性,覆盖区域和服务能力随时间变化,导致地面用户在不同时间和地点获得的服务质量存在显著差异,尤其是在地理位置偏远、人口密度低或资源匮乏的地区,服务分布的不均衡性尤为明显。此外,由于卫星轨道低、运行速度快,单颗卫星覆盖地面用户的时间较短。这种快速的链路切换和卫星覆盖的短暂性,导致了服务的连续性问题,影响实时通信、精确感知和大规模分布式计算等高需求应用的可靠性。

为应对这些挑战,未来的研究需要在多个层面进行突破。一方面,可以通过优化卫星星座的设计与部署策略,增加卫星的数量和轨道层级,以实现全球区域的更均匀覆盖;另一方面,利用地面与卫星的协同工作机制,通过多点接入和智能切换技术,增强服务的连续性与可靠性。此外,利用人工智能和大数据技术,可以对服务需求进行精准预测和调度,动态调整资源分配,确保在服务高需求的时段和区域,能够提供稳定的通信、感知和计算服务。同时,探索多源融合技术,结合卫星、地面基站、无人机等多种平台,实现对服务的全方位补充与延伸,也将成为解决服务分布不均

▼表1 通感算赋能的低轨卫星星座网络性能服务评价体系

类型域	评价项	关键指标
通信	通信性能	传输速率、频谱效率、能量效率、误码率
感知	感知性能	定位精度、感知范围、目标分辨率、图像熵
计算	计算性能	CPU利用率、计算服务响应时间、计算资源利用率
知能	数据域性能	数据融合精度、数据质量、数据一致性、数据处理时延
用控	网络协同性能	任务协调效率、资源利用均衡度、网络同步精度

与服务连续性问题的重要方向。

3) 大规模时空尺度数据处理

随着卫星数量的不断增加和遥感精度要求的不断提升,低轨卫星星座网络将会产生海量的时空数据。这些数据不仅来源广泛,形式多样,包括结构化数据、非结构化数据和半结构化数据,还具有显著的时间和空间相关性。传统的数据处理技术在面对如此复杂的数据集时,难以兼顾高效处理与数据完整性和准确性。特别是在通感算融合的背景下,网络需要在短时间内处理和分析这些数据,以支持实时通信、感知和计算任务。这对数据处理能力提出了极高的要求,需要开发新的算法和架构,以适应这种高频率、低时延的数据处理需求。

随着卫星网络的规模不断扩大,数据的时空分布呈现出更为复杂的特征。这意味着处理这些数据不仅需要考虑单个卫星或地面节点的计算能力,还需要协调多个节点之间的数据共享与任务处理。如何有效地融合这些数据,并从中提取出有价值的信息,是一个亟待解决的问题。

此外,低轨卫星星座网络在处理大规模时空数据时,还面临计算资源和带宽资源的双重限制。在轨的计算能力有限,无法支持大规模数据的实时处理,而将所有数据传输至地面再进行处理,既耗费大量带宽资源,也可能导致时延过大,影响任务的实时性。语义通信技术通过在传输过程中仅传递数据的关键语义信息,减少了数据量,节省了带宽资源,提升了任务的实时性和整体网络的稳定性。未来,需要深入研究语义通信与通感算融合技术的结合,开发出针对大规模时空数据的智能处理方案,以确保网络在复杂的时空数据环境下高效稳定运行。

4) 无线资源动态管控

随着低轨卫星数量的急剧增加,以及通信、感知、计算功能的深度融合,如何高效管理和分配有限的无线资源,以确保网络的稳定性、服务质量以及整体性能,成为未来发展的关键难题。

首先,卫星在轨道上的高速移动导致网络拓扑结构不断变化,从而引发资源需求的频繁波动。在这种环境下,传统的静态资源分配方法显然难以应对,需要引入能够实时感知网络状态和资源需求的动态管控策略。这种策略不仅要具备对当前资源使用情况的实时监控能力,还需能够预见未来的需求变化,并迅速调整资源分配,以适应不断变化的网络条件。

其次,通感算融合的特性进一步增加了无线资源管控的复杂性。在这种融合网络中,通信、感知、计算3种功能不仅相互依赖,还需要共享有限的无线资源。例如,在某些场

景下,感知任务可能需要更多的频谱资源来传输高分辨率的遥感数据,而通信任务则可能需要更大的带宽来支持实时数据传输和处理。这种多样化的资源需求要求资源管控系统具备高度的灵活性和智能化,能够根据任务的优先级和实际需求进行动态调整,确保关键任务得到优先保障。

最后,随着大语言模型和大数据技术的快速发展,无线资源管理系统正在向智能化方向迈进。通过对网络历史数据的分析与学习,大语言模型可以预测未来的资源需求趋势,并自动优化资源分配策略,这也对资源管理系统的计算能力和响应速度提出了更高的要求。未来,如何在资源管理中充分发挥以大语言模型为代表的人工智能的优势,并在极端复杂的网络环境中保持高效稳定的资源分配,仍将是一个重要挑战。

4 结束语

随着低轨卫星技术的蓬勃发展,通信、感知、计算融合已成为未来低轨卫星星座网络的长期演进趋势。本文围绕通感算融合对低轨卫星星座网络的赋能展开了系统性研究,深入分析和探讨了低轨卫星星座网络在通感算融合背景下的架构设计与关键技术,揭示了这一领域的重要地位与前瞻性发展方向。通过将通信、感知和计算有机融合,低轨卫星星座网络不仅突破了轨道资源紧张和独立功能系统的局限性,还为实现高度集成化和智能化的全球信息服务提供了新的可能性。本文提出的网络架构与关键技术方案,有望为实现空地一体化的多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算奠定坚实基础,并为未来多元化、智能化的全球信息网络发展提供全新思路与技术路径。

参考文献

- [1] 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
- [2] 李高, 王威, 吴启晖. 面向低轨卫星的频谱认知智能管控 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 7-11. DOI: 10.12142/ZTETJ.202105003
- [3] CAO X L, YANG B, SHEN Y L, et al. Edge-assisted multi-layer offloading optimization of LEO satellite-terrestrial integrated networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(2): 381-398. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3227032
- [4] JIAO J, SUN Y Y, WU S H, et al. Network utility maximization resource allocation for NOMA in satellite-based Internet of Things [J]. IEEE Internet of things journal, 2020, 7(4): 3230-3242. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2966503
- [5] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的6G通感算融合架构、技术与挑战 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20
- [6] 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G星地融合无线网络及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 42-49. DOI: 10.12142/

ZTETJ.202404007

- [7] 蒋忠元, 王森, 王启舟, 等. 低轨卫星多星协同及星地协同遥通算一体化技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 60-75
- [8] LI Y J, WANG M, HWANG K, et al. LEO satellite constellation for global-scale remote sensing with on-orbit cloud AI computing [J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2023, 16: 9369-9381. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3316298
- [9] HU Q F, JIAO J, WANG Y, et al. Multitype services coexistence in uplink NOMA for dual-layer LEO satellite constellation [J]. IEEE Internet of things journal, 2023, 10(3): 2693-2707. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3214927
- [10] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G愿景与关键技术 [J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11. DOI: 10.13190/j.jbupt.2021-081

作者简介



窦成龙, 澳门大学在读博士研究生; 主要研究领域为通感算一体化网络、非正交多址接入、边缘计算与边缘智能。



吴远 (通信作者), 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室副教授、IEEE Communications Society澳门分会副主席; 主要研究领域包括无线网络资源管理、边缘计算与边缘智能、感通算一体化网络等; 主持国家自然科学基金面上项目、澳门科技发展基金项目等项目; 研究成果获得IEEE ICC最佳会议论文奖、IEEE WCNC最佳会议论文奖等奖项。



钱丽萍, 浙江工业大学教授; 主要研究方向为无线通信与网络中的资源管理与优化理论、智能网络通信与计算融合、面向智能网络的分布式机器学习等; 主持多项国家自然科学基金项目、省部级科研项目; 研究成果获得浙江省通信学会科学技术奖一等奖、IEEE Marconi最佳论文奖、IEEE ICC最佳会议论文奖等奖项。



Tony Q. S. QUEK, 新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院教授、院长, IEEE Fellow; 主要研究方向为无线通信优化与统计理论的应用、网络信号处理和资源管理等; 2016—2019年连续4年获汤森路透高被引科学家称号, 2018年获得通信学会杰出讲师称号, 并获得2012年度IEEE William R. Bennett Prize奖、2017年通信理论技术委员会早期成果奖、2017年IEEE通信学会亚太优秀论文奖、2016年IEEE信号处理学会青年作者最佳论文奖; 发表IEEE期刊论文300余篇。