

星地一体化语义通信网络: 探索与展望



Semantic Communication for Satellite-Terrestrial Integrated Networks: Exploration and Prospects

李东博/LI Dongbo^{1,2}, 王新宇/WANG Xinyu^{1,2},
尹志胜/YIN Zhisheng^{3,4}, 承楠/CHENG Nan^{3,4}, 刘劼/LIU Jie^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学, 中国 哈尔滨 150001;
2. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 中国 哈尔滨 150001;
3. 西安电子科技大学, 中国 西安 710071;
4. ISN 全国重点实验室, 中国 西安 710071)
(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. State Key Laboratory of Smart Farm Technologies and Systems, Harbin 150001, China;
3. Xidian University, Xi'an 710071, China;
4. State Key Laboratory of ISN, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202505009

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20251016.1403.004>

网络出版日期: 2025-10-16

收稿日期: 2025-08-10

摘要: 围绕星地一体化网络中的语义通信, 系统综述了其架构设计、关键技术与建模框架, 并针对路由与资源管理等问题展开探讨。面向星地链路长时延、强多普勒频移及星上算力受限等约束条件, 提出了任务驱动的语义传输机制与鲁棒联合源信道编码策略, 同时探讨了多模态语义处理及知识库在线更新等关键问题。通过构建以语义意图与重要性感知为核心的跨层协同机制, 形成了面向星地场景的统一通信架构与可演进技术路线, 为该领域未来发展提供了理论支撑与系统指引。

关键词: 星地一体化网络; 语义通信; 智能化网络; 联合源信道编码; 大模型

Abstract: A systematic survey of semantic communication within integrated satellite-terrestrial networks is presented, focusing on architecture design, key technologies, and modeling frameworks, while also addressing issues related to routing and resource management. In response to constraints such as long round-trip delays, severe Doppler effects, and limited onboard computing capabilities in satellite-ground links, a task-driven semantic transmission mechanism and a robust joint source-channel coding strategy are proposed. Key challenges including multimodal semantic processing and real-time knowledge base updates are also examined. By establishing a cross-layer coordination mechanism centered on semantic intent and importance awareness, a unified communication architecture and an evolvable technical pathway tailored for satellite-ground scenarios are developed. This work offers theoretical foundations and systematic guidance for future advancements in the field.

Keywords: satellite-terrestrial integrated network; semantic communication; intelligent network; joint source-channel coding; large model

引用格式: 李东博, 王新宇, 尹志胜, 等. 星地一体化语义通信网络: 探索与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(5): 57-65. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505009

Citation: LI D B, WANG X Y, YIN Z S, et al. Semantic communication for satellite-terrestrial integrated networks: exploration and prospects [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(5): 57-65. DOI: 10.12142/ZTETJ.202505009

国际电信联盟 (ITU) 在《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》^[1]中明确了 6G 的 6 个典型应用场景与 15 项关键性能指标, 标志着通信技术向多维度能

力融合演进, 如图 1 所示。其核心特征体现为通信、感知、计算、人工智能 (AI) 与安全等要素的一体化集成, 以及星地融合的泛在连接。当前, 通信系统性能逐渐逼近理论极限, 现有通信体制难以匹配人工智能的设计范式, 且缺乏对复杂应用场景的灵活适配能力, 已成为制约发展的主要瓶颈^[2]。在通信领域, 无损高效传输是核心需求, 而多模态语义的提取与处理属于人工智能的关键任务。更高层次的语义

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (62350710797); 中国博士后科学基金特别资助项目 (2022TQ0091); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2022M720958); 黑龙江省重点研发计划项目 (2022ZX01A23); 全国重点实验室课题 (JD2023GJ01)

信息则为通信与智能的深度融合提供了途径^[3]。在此背景下,语义通信作为一种面向应用的新兴通信范式,通过与星地一体化网络深度融合,有望在保障高效可靠传输的同时,增强星地泛在连接能力,为突破理论极限、实现场景自适应通信等挑战提供新的解决思路。

当前,语义通信在星地一体化网络中的应用不断拓展^[4]。借助人工智能技术,其在资源调度、抗干扰能力、行为建模与信道建模等方面展现出显著优势。现有研究主要聚焦于语义通信对网络能力的增强与关键问题的解决,例如优化分布式边缘学习、压缩联邦学习数据以及加强隐私保护。在路由与资源优化方面,语义通信通过引入新型寻址与路由机制,有效提升了卫星网络的传输效率与可扩展性,并推动了网络仿真技术的发展。结合传统比特通信方式,语义通信进一步增强了星地网络在复杂环境下的鲁棒性与资源利用效率,在多模态数据处理、安全性保障及资源分配等方面表现出明显潜力。总体而言,语义通信为星地一体化网络提供了高效、智能、安全的解决方案,是推动网络智能化与自适应演进的关键技术。

尽管语义通信在星地一体化网络中展现出广阔前景,其进一步发展仍面临诸多挑战。在技术层面,挑战主要集中于

多模态数据中语义信息的高效提取、异构语义的有效融合以及计算复杂度的有效控制。在网络架构方面,要集成应用语义通信,就需对现有网络进行深度改造,具体涉及通信协议更新、硬件设备升级,并需构建新的安全机制以保障数据传输与处理的安全可靠。此外,语义通信目前缺乏统一的技术标准,导致系统间互操作性不足。因此,亟需推动行业标准的制定以支撑其规模化部署与应用。

1 星地一体化语义通信网络架构

语义通信作为一种区别于传统通信的新兴范式,其核心在于解决“传输符号如何精准传达含义”这一根本问题。近年来,随着人工智能技术的快速发展,语义通信已逐渐成为通信领域的重要研究方向^[5]。星地一体化网络,是一种融合了不同轨道卫星与地面蜂窝移动系统的多层次、多连接、多接入新型网络架构^[6]。二者均被视为6G网络的关键组成部分,因此在星地一体化网络环境下开展语义通信研究具有显著必要性。

语义通信与星地一体化网络的结合,源于其能够有效应对空间通信环境中的独特挑战。相较于传统地面网络,星地一体化网络中的语义通信不仅需优化带宽利用与降低时延,

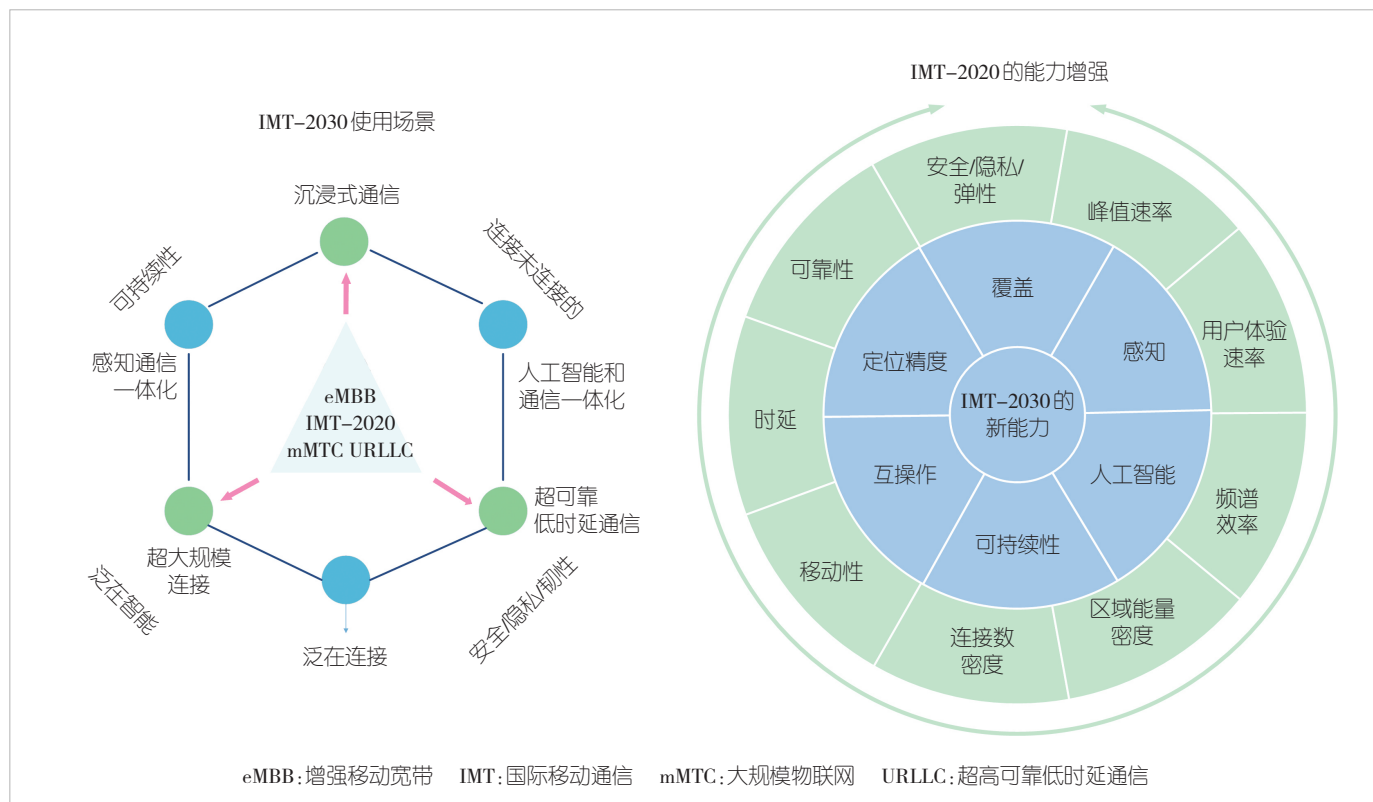


图1 6G的6个典型场景与15个性能指标

还需解决由长传输时延、资源严格受限及显著多普勒效应所引起的语义传递困难。在地面网络中,语义通信主要致力于提升带宽效率、降低传输时延,并利用上下文信息减少冗余数据传输。而在星地一体化网络中,语义优化更具重要意义,因其直接关系到有限能量与带宽资源的高效分配。同时,该系统还需确保信息在多样化传输条件下的语义保真度,从而提升关键数据传输的准确性与可靠性,以支撑广泛的应用场景需求。

1.1 语义通信的原理与特性

语义通信是一种基于信息内容理解的通信范式,其核心思想超越了传统的比特级传输模式。在语义通信中,信息的传输不仅是对原始数据流的简单复制,更侧重于对信息内涵的理解与语义层面的表达。其基本原理在于从原始信息中提取关键语义要素,通过组织、归纳与特征编码,实现语义的高效压缩与表示,从而在源头减少传输的数据量^[7]。在接收端,通过相应的语义解码与重构过程,保障信息含义的准确传递。图2展示了一种典型的语义通信系统模型,其中语义编码与解码对应于B级语义通信,而语法编译码部分属于A级技术通信范畴。

主要模块的定义及功能如下:

1) 语义知识库。语义知识库作为语义通信所特有的关键组成部分,其功能与传统通信系统有明显区别。该模块主要负责从信源或信宿中准确提取语义上下文信息,并收集信道传播环境中的语义相关特征。这些信息作为先验知识,为

语义编码与解码过程提供关键指导,从而保障信息传递的准确性。语义知识库的内容形式多样,可包括知识图谱、语义标签或环境特征等。

2) 语义编码器。语义编码器在语义知识库的支持下,与传统信源编码器相比,更注重从信源消息中提取与语义相关的特征,并传输任务所需的关键信息。它不仅可以依据语义属性和信道状态指导编码过程以实现精确解码,还具备一定的抗干扰能力,能够有效抑制传输过程中的噪声与扰动,从而确保编码结果既保持语义完整性,又具备信道适应性。

3) 语义译码器。语义译码器根据信宿需求,将接收到的语义信息重构为符合人类情感认知的具体消息,或转换为智能物联网终端可执行的任务指令。

相较于传统通信,语义通信具有以下明显特征:首先是高效性,由于传输的是信息的语义而非原始数据,因此可以明显减少传输数据量,提高通信效率^[8];其次是抗干扰性,语义通信对信号的形式不敏感,因此在一定程度上能够抵抗信道噪声和干扰^[9];然后是自适应性,语义通信可以根据信道条件和传输需求自适应地调整编码策略,以优化通信性能^[10];最后是智能化,语义通信涉及对信息内容的理解 and 处理,因此需要借助人工智能技术来实现高效的语义提取和表示^[8]。但是,我们仍需要看到,尽管语义通信相较于传统通信存在巨大优势,但其通信系统的设计也更为复杂。换句话说,语义通信就是以系统的复杂性为代价来提高通信效率。

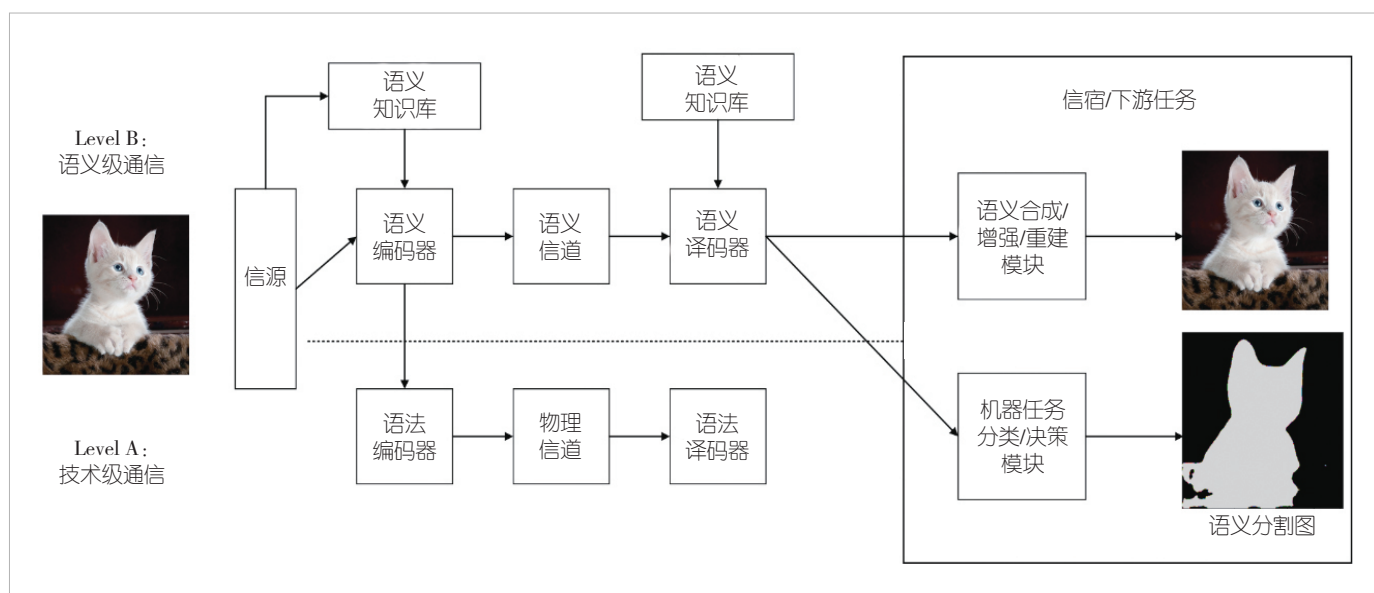


图2 语义通信系统的经典架构

1.2 星地一体化语义通信网络架构

星地一体化网络是一种将卫星通信网络与地面通信网络紧密融合的新型通信体系。它通过卫星和地面通信设施的无缝连接,实现全球范围内的宽带通信覆盖,旨在为用户提供无缝、高效、可靠的通信服务^[11]。星地一体化网络充分利用了卫星通信的广覆盖优势和地面通信的高容量特性,有效弥补了单一通信网络的不足,为全球通信提供了全新的解决方案^[12]。

随着星地一体化网络的日益发展,卫星网络与地面基础设施正加速融合,这将形成高度分区的网络拓扑,进而对路由协议的设计提出了新的要求,以实现高效的操作。此外,由于融合网络需同时支持多样化服务并跨越隔离的网络域,实现内容感知路由已成为一个亟须考量的目标^[13]。这也为语义通信的应用提供了潜在空间。

未来,物联网设备的大规模接入与卫星端有限的频谱资源之间将构成显著矛盾。语义通信因能有效压缩传输信息量,成为提升信道与频谱资源利用效能的关键途径。在星地一体化网络中,卫星凭借其广域覆盖优势,可为地面特别是传统网络盲区提供连接服务;而语义通信则能进一步增强该网络保障可靠连接的能力,其应用场景如图3所示。

在星地一体化语义通信网络架构中,语义知识库、语义信道、语义噪声及联合源信道编码等关键要素,共同构成了高效智能通信系统在语义层实现信息传递的基础。该架构中的语义知识库,依托知识表示、推理与检索等功能,并借助长短期记忆网络与大型语言模型,增强了其对通信内容的理解与处理能力,从而能够支撑个性化与情境感知服务,同时提升对多模态及非结构化数据的处理效能。

语义噪声是语义通信中的关键挑战,源于外部干扰或系统缺陷引起的信息失真,具体表现为信道干扰与解码偏差。为抑制其影响,需采用增强推理、优化编码及冗余抑制等技术来提升可靠性。自适应语义解码则通过动态优化解码过程来适应环境变化,从而减少失真。

联合源信道编码对语义通信至关重要,通过融合源编码与信道编码来优化通信链路。其中,源编码借助深度学习消除信息冗余,信道编码则通过引入冗余与纠错机制保障信息完整。该技术通过全局优化降低传输开销,并利用语义知识库与机器学习动态调整编码参数,从而显著提升通信效率与系统适应性。该技术根据网络状态的自适应策略能有效增强网络灵活性,是复杂环境下提升系统性能的方案。

1.3 星地一体化语义通信网络中的信息传输需求

在星地一体化网络中部署语义通信虽会引入额外计算开销,但由于其能大幅节约通信资源,该代价通常被视为可接受的权衡^[14]。然而,将语义通信融入星地一体化网络面临挑战:星地链路的长距离和高时延对语义信息的实时提取与编码要求更高;同时,系统必须在保障信息准确性的前提下,进一步降低通信开销,以适应卫星平台在资源与能量方面的

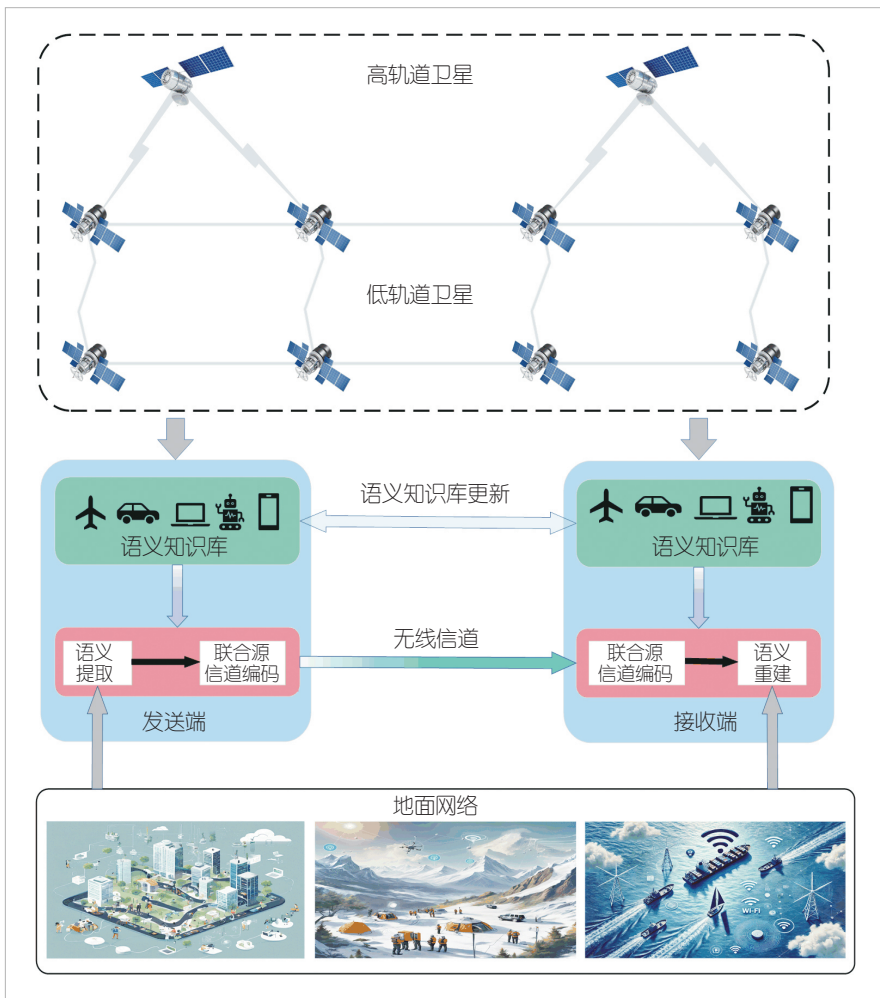


图3 星地一体化语义通信网络架构

严格限制。这些问题的解决,是充分发挥语义通信潜力的必要前提^[15]。

大型卫星网络的寻址与路由问题是星地一体化网络面临的关键挑战之一。由于星座拓扑的动态时变特性,传统IPv6协议的性能易受卫星星座类型与路由算法的制约。然而,若利用已知轨道参数这一卫星固有特性,语义寻址能够通过有限的索引键实现卫星标识,再与源路由技术相结合,可进一步构建新型语义路由方案^[16]。该方法对于硬件性能、功耗、链路带宽受限且系统复杂度高的卫星网络而言尤为重要。

尽管语义通信显著增强了星地一体化网络的性能,但现有通用语义框架难以直接适用于卫星部分,因此需研究新的语义技术。与此同时,未来6G网络明确以提升链路信道容量、开拓新频谱并优化无线通信频谱效率为核心目标^[17]。此外,星地链路存在的严重路径损耗与遮挡问题,也持续威胁着通信的稳定性。面对卫星端严苛的环境与复杂的链路条件,创新性的语义通信解决方案至关重要。引入无线能量收集、零能耗无线电等技术,可有效降低任务成本,并为人工智能提供无能耗连接的新方案^[17]。

在星地一体化语义通信中,安全传输是另一个关键挑战。通过结合多点共生安全策略与数字孪生技术,可以显著提升空间-空中-地面集成网络的安全传输性能^[18]。引入绿色干扰技术,在卫星-地面一体化通信中实现共生安全,能够在提升系统整体安全性的同时兼顾能源效率^[19]。多域资源复用方案也为卫星辅助物联网的物理层安全提供了有效途径,具体方法包括利用相邻节点产生的自诱导同信道干扰,在主信道与窃听信道之间制造不均匀信号破坏,从而保障卫星与物联网节点间的安全传输^[20]。此外,无人机(UAV)的引入为多波束卫星支持的车辆通信提供了额外的物理层安全保障^[21]。其灵活部署能力可用于优化上行链路的安全策略,在确保信息机密性的同时,维持网络公平性^[22]。上述创新技术表明,星地一体化网络在应对复杂安全威胁时,能够有效整合多样化的空间与空中资源,实现更高效、更安全的数据传输,为未来智能化空间通信网络的构建提供了理论基础与技术支撑。综上所述,语义通信不能直接适配到星地一体化网络当中,需要根据星地网络这一全新场景的要求进行能耗、算法、编解码效率、安全等方面的优化。

2 星地一体化语义通信网络关键技术

语义通信的发展离不开AI技术的支撑,而AI技术本身也早已被应用于星地一体化网络。例如,文献[23]在总结AI解决该网络所面临的问题时,提出了利用AI进行行为与信道建模以实现资源调度与抗干扰的初步构想,这被视为语义

通信在星地一体化网络中的早期雏形。

2.1 语义赋能的星地一体化网络

当前,星地一体化网络中语义通信的研究部分聚焦于利用语义能力为其他网络需求赋能。例如,文献[24]从边缘学习视角,探讨了分布式边缘学习与语义通信设计的相互作用;文献[14]研究了概率语义通信的能效,并在无人机中继场景下,提出了最小化总通信与计算能耗的迭代算法;文献[25]针对联邦学习中的通信瓶颈,利用语义通信将模型尺寸从5 MB压缩至5 kB,大幅降低了数据量;文献[26]提出了一种语义通信辅助的星载边缘云框架,通过剪枝与分割学习,在节省40.50%通信资源的同时降低51.43%的隐私风险;文献[27]则引入了“语义信息年龄”这一新指标,以评估应用层信息的时效价值,有效降低了卫星指令与传感器数据的平均年龄。

基于以上分析,语义通信在星地一体化网络中展现出多方面的优势,包括通信效率的提升、能耗的降低、资源管理效能的优化以及隐私安全保障的增强。通过与边缘学习、概率通信及联邦学习等技术结合,语义通信能够实现更高的能效、更低的传输时延,并有效支持通信资源的优化配置与智能计算卸载。此类技术融合显著减少了数据传输量,节约了系统资源,同时降低了隐私泄露风险。此外,语义新鲜度等新型度量指标的引入,进一步提升了通信的时效性与准确性。语义通信不仅推动了星地融合通信技术的发展,也为构建未来高效、智能、安全的集成网络提供了重要路径。

2.2 星地一体化语义通信网络中的路由与资源优化

语义通信在星地一体化网络中的另一重要应用方向聚焦于路由与资源优化。具体而言:文献[13]提出了语义赋能的算法,以实现多链路有效数据分发,并驱动网络管理、路由与资源分配,同时阐明了关键技术特征,构建了一个高效可扩展的多连通性模型;文献[16]设计了一种基于语义协议的全新寻址与路由方案,相较于传统IPv6协议,该方案能显著减轻卫星内的工作量,更适合太空环境下的大规模卫星网络;文献[28]进一步提出一种面向大规模星座的寻址路由方法,其利用卫星轨道参数进行语义寻址,支持通过星间链路实现数据路由,为巨型低轨星座提供IP连接能力;文献[29]则面向未来发展,描述了语义网络方法并提供了相应的星地通信系统仿真工具;文献[30]论证了本体工程在卫星网络仿真中提供语义支持的可行性,明确了其应用目标与内容。文献[31]将语义技术与软件定义网络(SDN)相结合,提出了

异构控制器本体映射算法,该算法能生成一致的全局网络视图,并具备高精度与低计算延迟的优势。

上述研究表明,语义通信在星地一体化网络中发挥着关键作用。它有效提升了多链路数据分发、网络管理与资源分配的效能,并通过创新的寻址与路由方案,显著增强了卫星网络的效率与可扩展性。面对大规模卫星星座的挑战,语义寻址策略保障了星间链路的高效连接与数据路由,为低轨卫星网络提供了可靠的IP互联基础。此外,语义通信有力推动了星地网络仿真工具的完善与验证能力的提升,并与软件定义网络深度融合,有效增强了网络灵活性与智能水平,为实现全局知识的一致性及高效管理提供了关键技术路径。语义通信在星地一体化网络中的核心价值将有力推动其向更高效、智能的方向演进。

2.3 星地一体化语义通信网络的模型

在星地一体化网络背景下,语义通信模型的研究已取得多方面进展。文献[32]提出了一种面向大规模物联网服务的语义授权星地一体化网络架构,通过语义通信与传统比特通信的协同,提升了系统在高资源效率与恶劣信道条件下的鲁棒性,并展现出显著增强的连接能力。文献[33]则构建了一种基于语义通信的星地一体化网络框架,系统阐释了在融合过程中所面临的多模态数据处理、安全机制与资源分配等关键挑战,并展望了语义通信对未来移动网络的潜在影响。文献[34]深入分析了星地一体化网络在大规模场景、高动态信道及受限设备能力方面的基本局限,基于香农信息论论证了语义通信替代传统比特通信的必然性,并详细阐述了相关性能指标体系与关键技术。其他研究也提出了各有侧重的语义通信模型:文献[35]聚焦于实时频谱感知,通过灵活部署无人机检测偏远地区频谱可用性;文献[4]提出基于生成式基础模型的语义卫星通信,借助分割与重建技术显著降低带宽需求,并在高噪声干扰下实现语义特征的准确恢复;文献[36]将语义通信与正交时频空调制相结合,有效抑制多普勒效应,提升传输速率与频谱效率;文献[37]则提出了语义驱动的卫星接入网切片方案,在考虑能源约束与资源稀缺的条件下,验证了其在节能与多任务支持方面的有效性。

综上所述,语义通信显著增强了星地一体化网络的鲁棒性与资源效率,其与比特通信的协同工作进一步提升了系统的连接能力与环境适应性。面对大规模物联网、高动态信道及受限设备能力带来的挑战,语义通信正逐步取代传统通信方式,成为支撑未来网络的关键技术。该技术通过传递信息意图,有效降低了带宽需求,提升了频谱利用

效率,并在高噪声干扰下保持了良好的传输准确性与可靠性。同时,语义通信也在多模态数据处理、安全保障与资源动态优化等方面推动着技术进步,为移动网络的演进开辟了新的可能性。

2.4 语义通信的关键技术创新

为实现语义通信与星地一体化网络的有效融合,仅依靠网络架构本身的创新仍显不足,语义通信本身也面临若干亟待突破的技术瓶颈。

在计算卸载与语义寻址方面,如何在实现高效语义信息压缩的同时保持较低的语义失真率,是当前语义通信面临的关键挑战。随着人工智能技术的持续演进,更多先进模型的开发与应用有望推动语义通信性能的进一步提升。大模型技术^[38]的快速发展也将为星地一体化网络与语义通信的深度融合提供重要支撑。

在星地一体化语义通信网络中,语义信息提取与压缩技术是实现高效传输的核心。通过引入自然语言处理与计算机视觉方法,可从海量原始数据中提取关键语义信息并进行有效压缩,从而显著降低传输负载,在有限带宽条件下提升通信效率。星地链路的干扰处理技术是保障网络稳定性的关键,结合信道估计与智能干扰消除算法,可有效抑制由大气扰动与电磁干扰导致的信号衰减,提升传输质量与系统鲁棒性^[39]。

多模态数据融合技术通过整合音频、视频与文本等异构数据,并依托深度学习算法实现跨模态语义提取,增强了系统在复杂数据环境下的理解与推理能力,为构建准确语义场景提供了支持。动态拓扑管理技术则基于自适应路由与网络优化机制,实时调整通信路径,在节点失效或网络拥塞时维持数据传输稳定性,并实现资源的高效调配。在此基础上,联合源信道编码技术结合机器学习对编码参数进行优化,进一步提升了复杂信道条件下的传输可靠性与带宽利用效率^[40]。

3 挑战与展望

2024年7月,北京邮电大学张平院士团队率先建成国际首个通信与智能融合的6G外场试验网,实现了6G典型应用场景下通信性能的全面提升,标志着以“通信与智能融合”为特征的6G关键技术取得新突破。该成果为星地一体化语义通信网络的研究奠定了理论基础,两者的深度融合已在学术界与产业界形成共识^[33]。尽管星地一体化语义通信网络展现出显著潜力与优势,但在实际部署中仍面临诸多挑战,主要体现在星地链路复杂干扰、网络动态拓扑、多模态

数据传输以及语义知识库构建等方面。

3.1 星地一体化语义通信网络面临的挑战

1) 星地链路面临复杂的干扰环境: 通信信号在穿越大气层过程中易受电磁干扰、雨衰、信道衰落及多径效应等因素影响, 引起信号衰减与随机噪声, 从而降低通信的可靠性与稳定性。语义通信以信息含义为核心, 可在一定程度上缓解干扰造成的影响, 但在极端条件下, 其抗干扰能力仍有待提升。此外, 卫星高速运动所导致的链路时延与动态变化, 也为实时数据传输带来挑战。因此, 发展能够适应动态干扰条件的鲁棒语义编码与解码技术, 成为提升星地链路通信质量的关键^[41]。

2) 星地一体化网络具有动态变化的拓扑特性: 受卫星节点高速运动的影响, 网络拓扑结构持续发生变化, 传统静态路由协议难以有效适应这一特点。因此, 如何设计能够适应动态拓扑的路由算法, 从而实现高效的语义路由, 已成为当前研究的关键难题。动态拓扑不仅影响路由决策的准确性, 还可能引发通信中断或传输延迟。为应对这一问题, 网络需引入具备自适应能力的新型路由协议, 借助机器学习与预测技术动态调整路由策略。同时, 系统还应实现快速的重新配置与恢复机制, 以保障通信的连续性与可靠性^[42]。

3) 多模态数据传输: 多模态数据传输在星地一体化网络中具有关键作用, 其目标在于整合视频、音频、图像与文本等异构数据, 实现跨模态的语义统一理解。传统系统通常对不同数据实施分离处理, 而语义通信则将其纳入统一框架中进行协同传输。在此过程中, 多模态数据的实时性与同步性至关重要。为此, 需在语义编码中引入更为智能的调度与优化机制, 从而有效提升数据传输的效率与准确性^[43-44]。

4) 语义知识库的构建: 语义知识库作为星地语义通信网络中智能信息处理的核心组成部分, 其构建面临多方面的挑战。当前基于深度神经网络与知识图谱的方法, 常受限于知识表示的有限性以及高昂的数据标注成本。同时, 在动态网络环境下, 频繁的知识更新需消耗大量计算与能源资源。为提升更新效率, 已有研究探索引入在线学习与迁移学习等机制, 以减少模型重新训练的需求, 并增强系统对动态环境的响应能力。此外, 知识共享过程中涉及的安全与隐私问题, 尤其在传输敏感信息时, 需借助分布式架构及差分隐私、联邦学习等隐私保护技术以降低相关风险。上述关键技术的有效结合, 将为星地一体化网络智能化通信的发展提供更高效支撑。

3.2 星地一体化语义通信网络的发展趋势

展望未来, 星地一体化语义通信网络技术的快速发展将带来更高效、更智能的通信能力, 主要体现在以下几个方面:

1) 基于现有基础设施的语义通信: 北京邮电大学张平院士团队的6G外场试验为星地一体化语义通信网络提供了基于4G/5G基础设施的可行演进路径。通过引入语义层技术, 现有网络可在无需大规模硬件更新的情况下, 提升智能化处理能力, 优化资源分配与数据传输效率, 从而改善通信质量与用户体验, 为6G系统的平滑演进奠定基础。

2) 更高效的语义提取与重建算法: 未来研究将致力于开发更高效的语义提取方法, 以在复杂干扰环境中准确捕获关键信息。此类算法将融合深度学习的最新进展, 增强对语义特征的识别与重构能力, 并促进多模态数据的协调传输, 实现无缝跨模态融合。

3) 高性能联合源信道编码算法: 联合源信道编码在语义通信中的进一步应用, 有助于降低冗余、增强鲁棒性, 从而提升通信效率与传输可靠性。该方向的进展将推动网络在受限带宽与复杂信道条件下实现高质量的语义传输, 有效节约频谱与功率资源。

3) 基于大模型的星地一体化语义通信架构: 大模型凭借其强大的语义理解与推理能力, 可显著提升星地语义通信网络的智能水平, 弥补私有知识库的表示局限。同时, 其在资源分配、网络管理以及语义知识库动态更新方面的潜力, 也有助于提升系统传输准确性、灵活性与安全性。

4) 星地语义通信中的非正交多址接入(NOMA)技术: NOMA在星地一体化网络中具有重要潜力, 可在同一频谱资源下支持多用户并发接入, 显著提升频谱效率。未来研究将进一步探索NOMA与语义通信的融合机制, 通过语义信息优先级调度实现智能资源分配, 缓解网络拥塞, 提升高密度用户环境下的整体通信性能。

4 结束语

语义通信技术在星地一体化网络中的应用, 彰显了其作为未来通信关键使能技术的重要地位。随着人工智能、边缘计算、软件定义网络等技术的快速发展, 语义通信持续取得创新突破, 为星地一体化网络的演进提供了新的理论支撑与实现路径。本文系统综述了星地一体化语义通信网络的体系架构与关键技术, 剖析了当前面临的主要挑战, 并对未来发展趋势进行了展望。通过深入探讨语义通信在星地网络中的融合机制与关键技术路径, 本文论证了其在提升通信效率、降低系统能耗、优化资源分配以及增强隐私保护等方面的核

心价值, 以期为语义通信与星地一体化网络的深度融合与开展提供参考。

参考文献

- [1] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [R]. 2023
- [2] 牛凯, 张平. 语义通信的数学理论 [J]. 通信学报, 2024, 45(6): 7-59
- [3] ZHANG P, LIU Y M, SONG Y L, et al. Advances and challenges in semantic communications: a systematic review [EB/OL]. (2023-12-05) [2025-08-05]. <https://www.sciengine.com/NSO/doi/10.1360/nso/20230029>
- [4] JIANG P, WEN C-K, LI X, et al. Semantic satellite communications based on generative foundation model [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2025, 43(7): 2431-2445. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3559113
- [5] 张亦弛, 张平, 魏急波, 等. 面向智能体的语义通信: 架构与范例 [J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(5): 907-921
- [6] 刁兆坤, 杨丽, 王振章. 6G 空天地一体化网络架构及其构建 [J]. 通信世界, 2024(4): 36-39
- [7] LIU Y T, WANG X J, NING Z L, et al. A survey on semantic communications: technologies, solutions, applications and challenges [J]. Digital communications and networks, 2024, 10(3): 528-545. DOI: 10.1016/j.dcan.2023.05.010
- [8] LUO X W, CHEN H H, GUO Q. Semantic communications: overview, open issues, and future research directions [J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(1): 210-219. DOI: 10.1109/mwc.101.2100269
- [9] ZHANG Y M, WANG F Y, XU W J, et al. Semantic communications: a new paradigm for networked intelligence [C]// Proceedings of IEEE 32nd International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). IEEE, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/mlsp55214.2022.9943480
- [10] YANG W, DU H, LIEW Z, et al. Semantic communications for future internet: fundamentals, applications, and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 1(25): 213-250. DOI: 10.1109/COMST.2022.3223224
- [11] 徐益平. 天地一体化网络发展趋势与挑战 [J]. 现代雷达, 2017, 39(7): 12-16
- [12] 杨昕, 孙智立, 刘华峰, 等. 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 58-63. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2016.04.012
- [13] COLA T D. Enabling effective multi-link data distribution in NTN-based 6G networks [C]// WSA & SCC 2023; 26th International ITG Workshop on Smart Antennas and 13th Conference on Systems, Communications, and Coding. IEEE, 2023: 1-5
- [14] ZHAO Z X, YANG Z H, CHEN M Z, et al. Energy-efficient probabilistic semantic communication over space-air-ground integrated networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025: 1. DOI: 10.1109/twc.2025.3569102
- [15] DE GAUDENZI R, OTTERSTEN B, PEREZ-NEIRA A, et al. Guest editorial space communications new frontiers: from near earth to deep space [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2024, 42(5): 1023-1028. DOI: 10.1109/jsac.2024.3378585
- [16] HAN L, RETANA A, WESTPHAL C, et al. Large scale LEO satellite networks for the future Internet: challenges and solutions to addressing and routing [EB/OL]. [2025-08-08]. https://www.researchgate.net/publication/373665888_Large-Scale_LEO_Satellite_Networks_for_the_Future_Internet_Challen
- ges_and_Solutions_to_Addressing_and_Routing
- [17] STRINATI E C, BELOT D, FALEMPIN A, et al. Toward 6G: from new hardware design to wireless semantic and goal-oriented communication paradigms [C]// Proceedings of ESSCIRC 2021 - IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC). IEEE, 2021: 275-282. DOI: 10.1109/esscirc53450.2021.9567793
- [18] YIN Z S, CHENG N, LUAN T H, et al. DT-assisted multi-point symbiotic security in space-air-ground integrated networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2023, 18: 5721-5734. DOI: 10.1109/tifs.2023.3313326
- [19] YIN Z S, CHENG N, LUAN T H, et al. Green interference based symbiotic security in integrated satellite-terrestrial communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(11): 9962-9973. DOI: 10.1109/twc.2022.3181277
- [20] YIN Z S, CHENG N, HUI Y L, et al. Multi-domain resource multiplexing based secure transmission for satellite-assisted IoT: AO-SCA approach [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(11): 7319-7330. DOI: 10.1109/twc.2023.3250227
- [21] YIN Z S, JIA M, CHENG N, et al. UAV-assisted physical layer security in multi-beam satellite-enabled vehicle communications [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(3): 2739-2751. DOI: 10.1109/tits.2021.3090017
- [22] YIN Z S, CHENG N, SONG Y C, et al. UAV-assisted secure uplink communications in satellite-supported IoT: secrecy fairness approach [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(4): 6904-6915. DOI: 10.1109/ijot.2023.3313197
- [23] FOURATI F, ALOUINI M S. Artificial intelligence for satellite communication: a review [J]. Intelligent and converged networks, 2021, 2(3): 213-243. DOI: 10.23919/icn.2021.0015
- [24] XU W, YANG Z H, NG D W K, et al. Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: semantic communication, edge computing, and wireless sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2023, 17(1): 9-39. DOI: 10.1109/jstsp.2023.3239189
- [25] MU J S, CUI Y H, OUYANG W J, et al. Federated learning in 6G non-terrestrial network for IoT services: from the perspective of perceptive mobile network [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 72-79. DOI: 10.1109/mnet.2024.3380647
- [26] ZHENG G H, NI Q, NAVAIE K, et al. Semantic communication in satellite-borne edge cloud network for computation offloading [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2024, 42(5): 1145-1158. DOI: 10.1109/jsac.2024.3365879
- [27] GAO R H, LI Y, XU Y L, et al. Semantic LTP: an age-optimal bundle delivery mechanism in space disruption-tolerant networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2024, 42(5): 1159-1174. DOI: 10.1109/jsac.2024.3365872
- [28] HAN L, RETANA A, WESTPHAL C, et al. New IP based semantic addressing and routing for LEO satellite networks [C]// Proceedings of IEEE 30th International Conference on Network Protocols (ICNP). IEEE, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/icnp55882.2022.9940332
- [29] DĄBROWSKA-KUBIK K. Semantic network of ground station-satellite communication system [M]// Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 369-378. DOI: 10.1007/978-3-642-15393-8_42
- [30] LIN Q, XIONG Z, LI Z. Semantic modeling in satellite network simulation [C]// Proceedings of Asia Simulation Conference - 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. IEEE, 2008: 877-881. DOI: 10.1109/asc-icsc.2008.4675486

- [31] IEEE. Message from the SmartCity 2021 general chairs [C]// Proceedings of IEEE 23rd Int Conf on High Performance Computing & Communications; 7th Int Conf on Data Science & Systems; 19th Int Conf on Smart City; 7th Int Conf on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys). IEEE, 2021: 571 - 578. DOI: 10.1109/hpcc-dss-smartcity-dependsys53884.2021.00014
- [32] DENG D H, WANG C W, XU L X, et al. Semantic communication empowered NTN for IoT: benefits and challenges [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 32 - 39. DOI: 10.1109/mnet.2024.3383604
- [33] PENG H X, ZHANG Z H, LIU Y L, et al. Semantic communication in non-terrestrial networks: A future-ready paradigm [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 119 - 127. DOI: 10.1109/mnet.2024.3380817
- [34] MENG S Q, WU S H, ZHANG J M, et al. Semantics-empowered space-air-ground-sea integrated network: new paradigm, frameworks, and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2024, 27(1): 140 - 183. DOI: 10.1109/comst.2024.3416309
- [35] YI P, CAO Y, XU J R, et al. Semantic communication for remote spectrum sensing in non-terrestrial networks [C]//Proceedings of IEEE 32nd International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). IEEE, 2022: 1 - 6. DOI: 10.1109/mlsp55214.2022.9943492
- [36] CHEN W B, LI S Y, JU C, et al. Semantic-enhanced downlink LEO satellite communication system with OTFS modulation [J]. IEEE communications letters, 2024, 28(6): 1377 - 1381. DOI: 10.1109/lcomm.2024.3386748
- [37] YOU C Q, HE X Q, ZHANG Y J, et al. SemSAN: semantic satellite access network slicing for NextG non-terrestrial networks [C]//Proceedings of ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/icc51166.2024.10622974
- [38] RONG B, RUTAGEMWA H. Leveraging large language models for intelligent control of 6G integrated TN-NTN with IoT service [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 136 - 142. DOI: 10.1109/mnet.2024.3384013
- [39] 吕守晔, 戴金晟, 张平. 信源信道联合的新范式: 语义通信 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 2-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202302002
- [40] 辛港涛, 樊平毅. 语义信息论的回顾与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 9-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202302003
- [41] 徐晖, 陈山枝, 艾明. 面向6G的星地融合网络架构 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 27(2): 9-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305003
- [42] 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
- [43] 瞿重希, 毛浩斌, 许憧, 等. 面向6G的星地融合网络频谱共享技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 50-56. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008
- [44] 张可, 林文超, 王野. 面向星地通信的低复杂度通用编译码技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 30-40. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405006

作者简介



李东博, 哈尔滨工业大学计算学部副研究员、智慧农场技术与系统全国重点实验室通信与计算系统研究室负责人; 研究方向为空天智能系统、星地融合网络、大模型与多模态融合、语义通信等; 主持/参与国家级/省部级项目 20 余项; 发表学术论文 20 余篇。



王新宇, 哈尔滨工业大学在读博士研究生; 主要研究方向为卫星网络、语义通信等。



尹志胜, 西安电子科技大学、ISN 全国重点实验室副教授; 主要从事空天地一体化网络与传输方面的研究, 具体方向为空天安全通信、电磁对抗、智能传输等; 主持/参与国家级/省部级项目 20 余项; 发表学术论文 100 余篇。



承楠, 西安电子科技大学、ISN 全国重点实验室教授, 博士生导师, 国家高层次青年人才; 长期从事空天地海一体化智能网络与通信、电磁空间孪生及其应用、大模型与智能体通信相关研究; 主持多个科研项目; 发表学术论文 100 余篇。



刘劼, 哈尔滨工业大学讲席教授、人工智能研究院院长, 智慧农场技术与系统全国重点实验室主任, 物联网智能技术工信部重点实验室主任, 农业农村部东北规模化智慧农业重点实验室主任, 国家高层次人才, IEEE Fellow, ACM 杰出科学家, ACM SIGBED CHINA 发起人和主席; 主持科技创新人工智能重大专项、国家自然科学基金重点等项目; 研究方向为智能感知、智能物联网系统和人机物融合系统; 发表学术论文 140 余篇。