Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Theory and Key Technologies in Satellite Internet Networking—Review

6G 星地融合网络的网络层视角研究综述

陈诺[a]，宋宇杰[a]，曹越[a,*]，孙智立[b,*]，赵波[a]，王密[c]，何德彪[a]，彭国军[a]

[a] School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430000, China
[b] Institute for Communication Systems (ICS), School of Computer Science and Electronic Engineering & Faculty of Engineering and Physical Science, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK
[c] State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping, and Remote Sensing, Wuhan 430000, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 3 November 2024
Revised 25 April 2025
Accepted 7 May 2025
Available online 2 June 2025

关键词
星地融合
网络技术
智能交通

摘要

近年来，星地融合网络受到业界广泛关注，已在智能交通、应急救援等多个领域得到规模化应用。本文从网络层视角出发，对星地融合网络（STIN）技术的最新研究进展展开全面梳理与综述，依据网络业务流将相关核心技术划分为拓扑维护、网络路由、编排传输三大类别。同时，从网络层这一全新研究视角，探讨了星地融合网络在各领域的实际应用，以及配套的技术框架、平台、仿真器和相关数据集。最后，本文以网络层为创新切入点，深入探究星地融合网络技术的主流研究方向，系统梳理现有研究文献、研判未来发展趋势，并进一步探讨了该技术与相关领域的交叉融合及合作机遇。

© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. 引言

1.1. 研究背景

随着第五代移动通信（5G）技术、第六代移动通信（6G）技术的飞速发展，加之航空航天领域的技术持续革新，星地融合网络（STIN）已成为业界研究与应用的焦点。这类网络以拓展地面通信系统的应用边界为核心目标，同时精准契合全球对泛在网络连接日益增长的需求，具备覆盖范围广、通信时延低、抗毁性强等核心技术特性。依托卫星网络的技术优势，星地融合网络能够在各类复杂环境下实现通信与数据的无缝传输，有效弥合数字鸿沟，为全球40亿人口的网络连接提供可靠保障[1]。值得关注的是，卫星网络是推动通信技术从5G向6G演进的关键支撑，而6G也成为依托卫星连接实现能力跃升的5G新一代演进形态。

卫星网络已广泛应用于遥感、通信等诸多领域，尤其为环境监测、位置服务、智能手机卫星直连、分布式计算等应用提供了核心技术支撑[2]。卫星网络之所以能得到规模化应用，核心原因在于其可完成多参与方数据处理等复杂任务；同时相较于地面网络，卫星网络具备更优的可扩展性与抗毁性，在偏远地区通信保障、地面网络故障应急等场景中优势尤为显著[3]。依托这些技术特性，卫星网络能够灵活适配乡村通信覆盖等多样化的应用需求。

地面网络在支撑卫星网络运行方面同样发挥着关键作用，主要负责高速数据处理与本地通信连接工作。如今的地面网络已从传统的有限覆盖型基础设施，逐步发展为全

* Corresponding authors.
E-mail addresses: yue.cao@whu.edu.cn (Y. Cao), z.sun@surrey.ac.uk (Z. Sun).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
英文原文：Engineering 2025, 54(11): 69–92
引用本文：Nuo Chen, Yujie Song, Yue Cao, Zhili Sun, Bo Zhao, Mi Wang, Debiao He, Guojun Peng. Network-Layer Perspectives on Satellite-Terrestrial Integrated Networks in 6G: A Comprehensive Review. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.05.012

球通信体系的重要组成部分，承担着星地间数据传输、卫星切换协调等核心任务。

从某种意义上来说，卫星网络是地面网络的延伸与拓展。传统应急通信多依赖无人机（UAV）等移动载具的通信能力，但这类设施在偏远地区或应急救灾场景中，易出现受损、失效等问题。而卫星网络凭借其广域覆盖的技术特性，能够在偏远区域或受灾地区搭建起稳定的全球通信链路，有效提升应急救援的通信保障能力。图1展示了空天地一体化网络（SAGIN）为城市提供全方位通信保障的实现模式。

1.2. 研究动因

以往的研究主要聚焦卫星网络的物理层，包括信号传输、调制技术和信道模型等方面[4–7]。本文在现有研究基础上，从网络层视角对卫星网络展开研究。尽管已有学者针对卫星网络的网络层开展相关研究[8–9]，但目前仍缺乏对卫星通信网络技术的全面分析，相关研究文献尚处于起步阶段。现有综述虽对星地融合网络的技术进行了分类，但往往缺乏前沿研究视角、统一的分类标准，且对关键研究主题的覆盖不够全面。为弥补这些研究空白，本文梳理了相关研究成果，重点聚焦拓扑维护、网络路由、编排传输等核心技术，分析星地融合的技术优势。

将这些技术与卫星、高空平台、无人机等非地面网络融合，有望实现全球网络覆盖。此外，人工智能（AI）驱动的解决方案在该领域的影响力正不断提升。从信号处理角度来看，人工智能被用于优化频谱感知，提升6G网络的性能[10]。从底层技术来看，可重构智能表面（RIS）与人工智能驱动的频谱学习相结合的技术，正被逐步应用于卫星网络，旨在提升能源效率和通信性能[11]。通信策略同样受益于人工智能技术，人工智能辅助的RIS介质访问控制，通过优化频谱利用、提升通信质量，在星地融合网络中发挥关键作用[12]。此外，RIS辅助网络的联邦频谱学习技术，能够实现网络节点间的协同优化，大幅提升频谱效率[13]。从应用角度来看，基于人工智能的多任务学习技术，有效提升了无人机与卫星之间的协同能力，改善了空天地通信效果[14]；人工智能驱动的边缘智能技术也正被应用于自动驾驶等先进自主系统，在星地融合网络框架下，为无线通信系统的发展带来巨大潜力[15]。然而，构建稳定、可持续的星地融合网络仍面临诸多挑战：第一，与地面网络节点相比，卫星具有高移动性，难以维持稳定的网络连接；第二，网络节点间的协同工作，需要实现网络拓扑的实时感知与构建；第三，多约束条件下的低效路由机制，可能影响数据安全、降低数据传输质量；第四，提升卫星网络的传输效率，需要实现卫星与地面站之间的高效协同。因此，如何解决上述挑战，成为推动卫星网络实际应用的关键。

1.3. 研究贡献

本文对星地融合网络技术展开研究，创新性地聚焦于以往综述中未深入探讨的网络层视角，并将SAGIN作为该领域的成熟模型进行重点分析，研究围绕优化传输路径、提升数据传输效率、改善网络整体性能展开。基于此，本文梳理了网络层面临的主要挑战，并提出拓扑维护、网络路由、编排传输三类技术方案以应对这些挑战。同时，本文介绍了卫星网络的最新发展成果，包括相关平台和仿真器，并展望了未来的研究方向。表1 [6,8,16–22]为本文与现有相关综述的对比分析。

本文的研究贡献总结如下。

（1）从网络层视角，对星地融合网络的核心技术进行深入分析，重点研究拓扑维护、网络路由和编排传输技术，结合星地融合网络的独特性质，分析各类技术的性能、面临的挑战及最新研究进展。

（2）分析卫星网络的技术创新点及其在不同场景中的应用，同时探究其在交通、金融、工业等领域的新兴应用，从更广阔的视角分析卫星网络的性能表现。

（3）通过对卫星网络的框架、仿真器和数据集进行分类，创新性地探究星地融合网络内部的互联机制；深入分析这些技术在网络层面临的特有挑战，并提出未来的研究方向，以期推动星地融合网络的发展。

图2为本文的整体结构框架，后续内容安排如下：第2节介绍星地融合网络的概念、技术分类及SAGIN的架构；第3节分析星地融合网络面临的问题，并阐述图论方法等相关解决技术；第4节探讨节点管理、拓扑管理、计算、监测等拓扑维护技术；第5节根据不同原理，对网络路由技术进行分类和梳理；第6节聚焦编排与传输技术；第7节分析星地融合网络的主要应用场景，并探讨实际应用案例；第8节梳理相关的框架、平台、仿真器和数据集；第9节探讨星地融合网络与相关领域的交叉融合，并分析未来的研究方向；最后，第10节对全文进行总结。

2. 基础理论

深入理解6G卫星通信模型的概念和架构，是研究星地融合网络技术的基础。因此，本节将介绍星地融合网络的基本概念，并对SAGIN的架构进行深入分析。

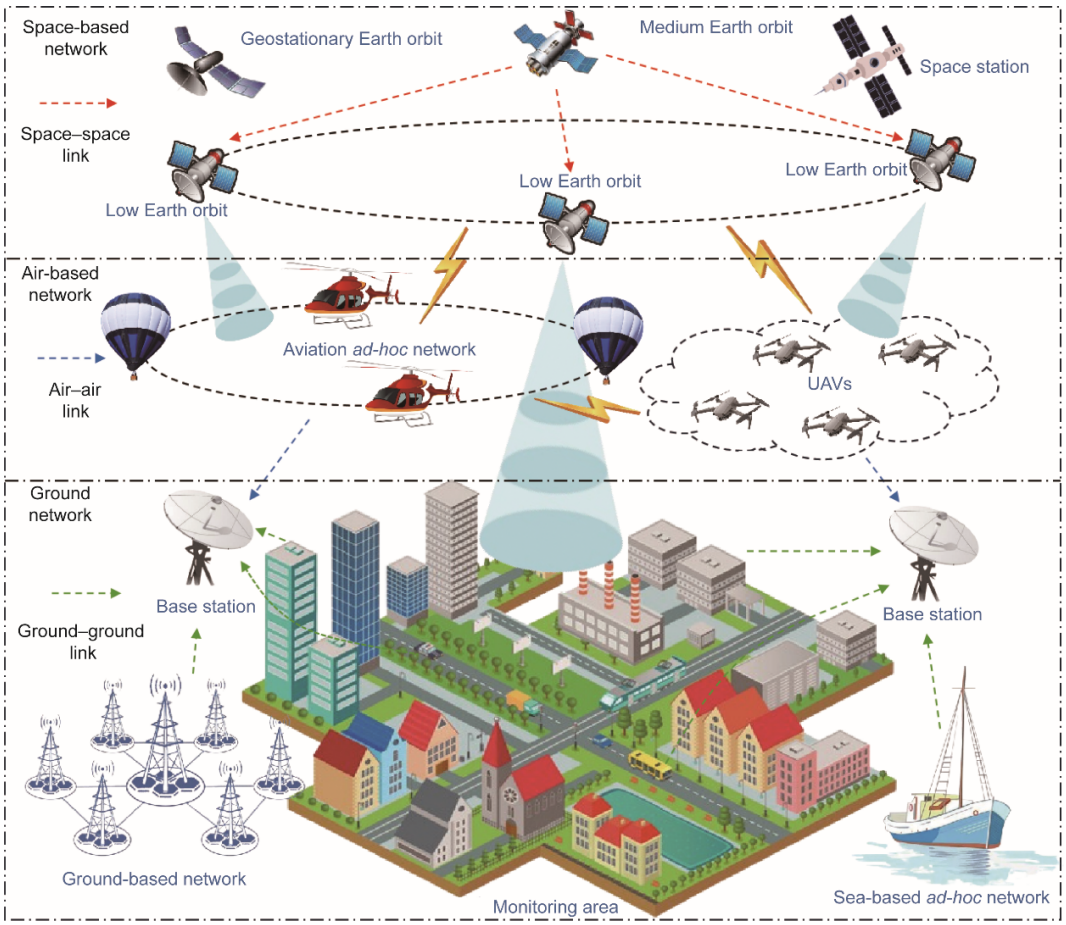

图1. 空天地一体化网络为城市提供全面通信保障的示意图。

表1 现有相关综述对比

Ref.	Year	Challenges and considerations addressed	Classification of technical focus areas				
			Resource management	System integration	Safety protection	Multilayer cooperation	Energy consumption
[16]	2018	System modeling, protocol optimization, resource acquisition and allocation	√	—	√	—	—
[17]	2020	Resource constraints, integration, real-time and reliable communications	√	√	√	√	—
[18]	2021	System optimization by blockchain, effective and secure communications	√	√	—	√	—
[6]	2022	Security constraints from multilayer cooperation and open communication	—	√	—	√	—
[19]	2022	Cognitive spectrum use, secure communication, energy efficiency	√	—	√	√	√
[8]	2023	Resource constraints such as latency, throughput, capacity, and operation cost	—	—	√	—	—
[20]	2024	Conflict between trust and privacy protection in the architecture	√	—	—	√	√
[21]	2024	Data transmission obstructed by barriers, signal errors, signal fading	√	√	—	—	—
[22]	2025	Traditional communication no longer applicable for limitations such as dynamics	√	—	√	—	—
This study	2025	Topology maintenance, network routing, and orchestration transmission	√	√	√	√	√

2.1. 星地融合网络概述

星地融合网络实现了卫星网络与地面网络的优势互补，卫星网络弥补地面网络的覆盖空白，提升偏远或通信薄弱地区的网络连接能力。

（1）卫星网络。卫星网络是利用多颗卫星实现广域数据传输的通信系统，适用于道路、桥梁等地面基础设施及传统通信网络难以覆盖的区域。航空航天技术的进步和卫星发射成本的降低，推动了卫星网络的广泛部署，各行业对卫星网络的依赖程度不断提升。这些技术进步让卫星通信系统的传输速率得以提升、时延降低、覆盖范围扩大，其中，新兴的低轨（LEO）卫星星座更是为提升全球互联网覆盖水平、保障通信薄弱人群的网络连接提供了支撑。

（2）地面网络。地面网络是基于光纤、电缆、无线电波、微波等地面基础设施构建的通信系统，为城市和农村地区提供高速互联网接入和稳定的通信服务。近年来，光纤和无线通信技术的不断发展，让地面网络成为现代通信的核心基础设施，其广泛的覆盖范围和优异的性能，为多个行业的各类应用提供了技术支撑。

星地融合网络的核心理念，是实现卫星网络与地面网络的无缝融合，使二者优势互补、相互支撑，弥补各自的技术短板：卫星网络将覆盖范围拓展至地面网络无法触及的偏远或通信薄弱地区，实现全球泛在连接；地面网络则凭借高速数据传输和超低时延的特性，在人口密集的城市地区发挥优势，高效处理高流量的通信需求。二者融合构建起稳健的通信生态体系，确保在各类环境下为用户提供持续、稳定的网络连接，满足多样化的通信需求。

2.2. 星地融合网络的关键技术

星地融合网络技术将卫星与地面系统相结合，实现空天与地面信息的融合，为各类应用赋能。

（1）遥感技术。该技术利用光学和雷达影像，提升环境监测的精度，通过多时相数据融合技术分析时间序列数据，能够实现环境变化、农业生长态势等动态监测。

（2）导航技术。该技术融合全球卫星导航系统与地面增强系统，提升定位的精度和可靠性；同时结合卫星导航、惯性导航、视觉导航等多种方法，实现高精度定位。

（3）通信技术。该技术协调卫星与地面站的工作，实现广覆盖、高带宽的通信，为偏远和灾害易发地区提供通信保障；并融合卫星互联网与地面互联网，实现全球无缝连接，提升整体通信网络质量。

（4）数据融合技术。该技术融合卫星和地面的多源数据，整合气象、环境等各类信息，为决策提供数据支撑；同时依托云计算和大数据技术实现数据的实时处理，提升星地数据的分析速度和效率。

2.3. 空天地一体化网络的架构框架

SAGIN从更广阔的视角出发，融合了空、天、地三层网络，其架构根据组件的空间位置分为三层，如图3所示。

（1）天层。该层包含低轨、中轨（MEO）、地球静止轨道（GEO）等各类卫星。其中，低轨卫星距离地球较近，提供低时延的通信服务，适用于实时性要求高的应用；中轨卫星处于中等高度轨道，常被用于全球定位系统等导航系统，在覆盖范围和时延之间实现平衡；地球静止轨道卫星位于高轨道，相对地球表面保持静止，能够为大

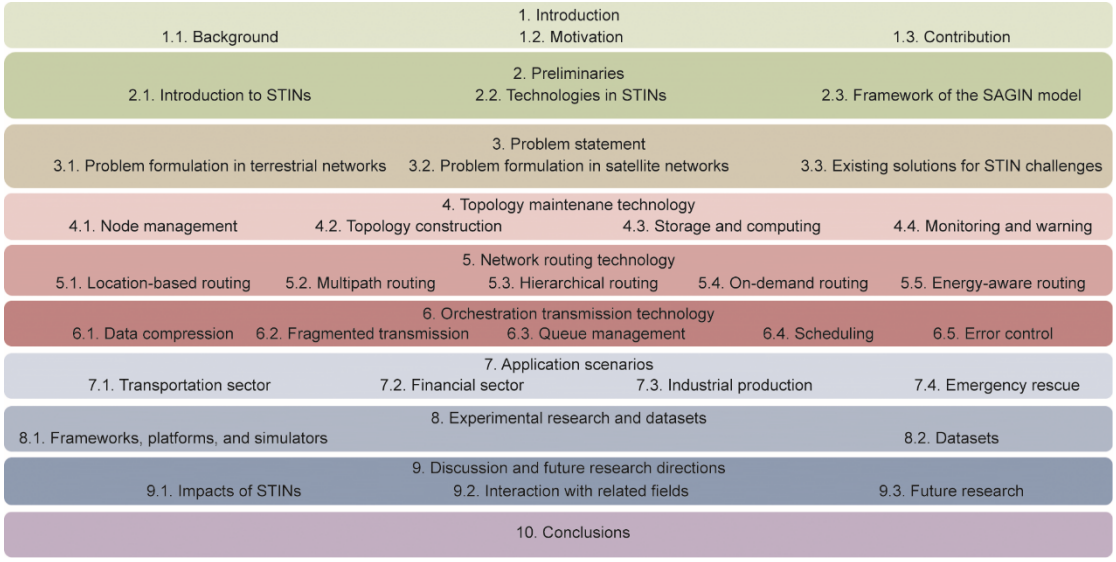

图2. 本文的综述架构示意图。

面积区域提供持续的通信服务。这些卫星通过自由空间光通信技术建立链路，实现网络内高效的数据传输和信息交互，共同构成支撑全球通信、导航、观测服务的综合系统。

（2）空层。该层包括无人机、高空气球、高空平台等设备，主要承担数据中继和传输任务，为环境数据采集、高分辨率影像传输等多种应用提供支撑，是灾害应急响应、大气数据采集、地理空间测绘等任务的重要技术保障。

（3）地层。该层包含地面基础设施网络、车载自组织网络、工业物联网（IoT）等多种网络，是SAGIN的核心层。该层依托成熟的技术和稳定的链路，保障网络的持续连接和信息交互，主要承担数据采集、处理和用户服务等功能，为自动驾驶、工业自动化等应用提供支撑；同时，该层在5G网络中应用广泛，在高速数据传输、低时延通信、大规模设备连接等方面表现优异。

3. 问题阐述

本节梳理星地融合面临的挑战，分析并分类地面网络和卫星网络的常见问题，同时对星地融合的主要挑战进行总结和分类，全面梳理星地融合面临的问题。

3.1. 地面网络的问题梳理

星地融合网络的研究，既需要解决地面网络固有的问题，也需要应对融合带来的新挑战。地面网络面临端到端安全、能耗等诸多挑战，表2 [23–36]梳理了该领域的相关研究成果，包括研究目标和局限性。

3.1.1. 地面网络的基础性能

地面网络的基础性能直接影响用户体验质量（QoE），具体包括效率、时延、安全性等多个方面。尽管这些指标的研究视角不同，但核心目标都是为用户提供优质的基础通信服务。

（1）频谱管理。高效的频谱管理与分配是优化现代无线网络性能的关键，受到学界和工业界的广泛关注。Patil等[23]利用人工智能和机器学习技术研究智能频谱共享技术，旨在解决频谱分配难题，通过高效的频谱管理提升系统性能。Ullah等[24]研究了结合正交时频空调制的编码大规模多输入多输出技术，以提升频谱效率。但目前频谱管理和分配仍面临诸多难题，亟待进一步的技术突破。

（2）吞吐量与时延。实现高效的无线通信，关键在于提升吞吐量、降低时延，对这些指标的有效管控，是视频实时流、在线游戏等现代应用的核心需求。有学者针对增强型移动宽带（eMBB）与超高可靠低时延通信（URLLC）的共存问题展开研究[25]，重点聚焦资源调度策略，提出了复用、机器学习、网络切片、云无线接入网架构、服务质量（QoS）指标五大核心策略，并结合增强型移动宽带的吞吐量需求，以及超高可靠低时延通信的时延和可靠性要求，对各策略的有效性进行评估。Mourtzis等[26]探究了5G和触觉互联网在解决时延问题、赋能智能制造方面的应用。当前，地面网络面临的核心挑战是，如何通过优化吞吐量，在满足超高可靠低时延通信严苛的时延和可靠性要求的同时，实现增强型移动宽带与超高可靠低时延通信的高效共存。

（3）安全性。在地面网络中，保障敏感信息安全、实

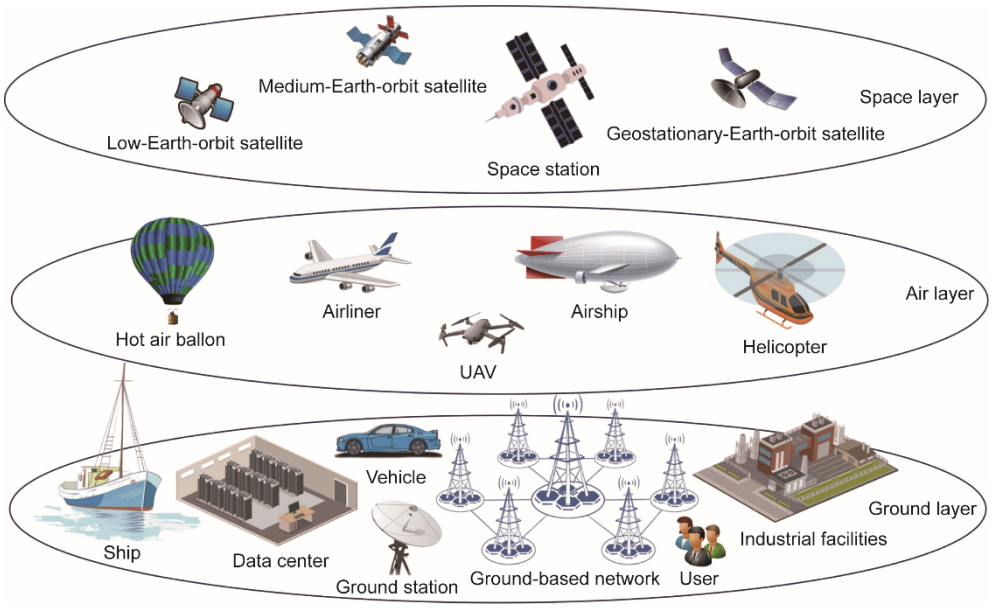

图3. 空天地一体化网络的三层架构示意图。

现安全通信是亟待解决的重大挑战，需要通过完善的技术手段保障数据完整性、维护用户隐私。Chawla和Mehra[27]分析了5G物联网面临的安全挑战，重点关注开放网络安全和双向认证问题，研究指出传统密码学方法存在局限性，强调发展抗量子密码解决方案的必要性。Ramezanpour和Jagannath [28]指出，5G/6G网络亟须引入零信任原则，针对不可信网络组件带来的挑战，提出了智能零信任架构，强调依托基于机器学习的组件，提升动态、不可信网络环境下的安全性。此外，Afaq等[29]指出了5G网络中存在的身份篡改、供应链投毒等重大安全问题，强调需要利用机器学习解决方案应对这些安全漏洞。

（4）自动化与智能化。为解决地面网络在时延、可靠性、可用性等方面的性能挑战，自动化和智能化技术成为研究重点。Velasquez等[30]分析了5G/6G网络编排面临的诸多挑战，重点关注严苛的时延、可靠性和可用性要求，并提出了人工智能驱动的编排解决方案，旨在应对网络编排的复杂性，保障服务的高效部署。Guo等[31]提出了基于中继选择和功率分配技术的协同通信框架，通过优化中继部署，提升干扰管理和资源调度的效率。

（5）缓存与内容分发。缓存与内容分发问题，核心是对热门内容进行高效管理，这一问题给5G和物联网网络带来了较大的流量压力。Prerna等[32]分析了5G网络中内容缓存和分发的低效问题，重点关注其给网络基础设施带来的负荷。Mistry等[33]综述了区块链技术在工业自动化领域5G物联网中的应用，指出地面网络在缓存和内容分发方面存在的问题，包括集中式访问控制的弊端，以及对

表2 地面网络的问题梳理

Focus	Type	Ref.	Objectives	Methods	Restrictions
Fundamental performance	Spectrum management	[23]	Efficient spectrum allocation	Spectrum utilization scheme introducing AI and machine learning	Spectrum management
		[24]	Optimize spectral efficiency and reduce channel estimation errors	Orthogonal time-frequency space-modulation method	Bit error rate
	Throughput and latency	[25]	Increase enhanced mobile broadband throughput	Mechanisms for enhanced mobile broadband and ultra-reliable low-latency communication coexistence	Stringent latency and reliability requirements for ultra-reliable low-latency communication services
		[26]	Improve backbone reliability and reduce latency	Introducing the tactile Internet	Communication delay
	Security	[27]	End-to-end security	Quantum-based solutions	Open Web security + mutual authentication
		[28]	Provide information security in an untrusted network	Dynamic trust algorithm based on AI and the zero-trust principle	Connecting more devices increases the attack surface
		[29]	Improve dynamics of security mechanisms	Automation architecture based on machine learning	Security challenges + privacy issues
	Automation and intelligence	[30]	Orchestration opimization	Distributed automation solutions driven by AI	Delay + reliability + availability
		[31]	Robust interference management and resource scheduling	Cooperative resource allocation with spectrum sharing	Communication resources limited
	Caching and content distribution	[32]	Maintain quality of service and quality of experience for users and service providers	Device-to-device sharing based on cached most popular content	Access delay
		[33]	Enable efficient device-to-device communication	Distributed access control mechanism based on blockchain	Single point of failure + high computing overhead
Future development direction	Energy efficiency and sustainability	[34]	Promote sustainability and reduce operational costs	Use of renewable energy and management technologies	System energy consumption + CO_2 emissions
		[35]	Minimize energy consumption	Introducing cognition-based green communication technologies	System energy consumption + resource scarcity
	Network virtualization and flexibility	[36]	Fine-grained support for a range of heterogeneous 5G use cases	Decouple network functions for software-based virtualization	Flexibility + reconfigurable + programmable

去中心化解决方案的需求，并对现有方法进行对比分析，重点评估各方法在解决相关问题、提升安全性和数据管理能力方面的有效性。

地面网络的基础性能问题，如频谱管理低效，会大幅降低服务质量、造成资源拥塞，进而导致吞吐量不足、时延过高，出现网络连接卡顿、中断频繁等问题；此外，安全和隐私保护的短板会让用户面临数据泄露风险，进一步降低服务质量；同时，自动化水平不足会影响网络的自适应能力，而缓存机制不完善则会增加时延，导致数据访问卡顿。

3.1.2. 地面网络的未来发展方向

为满足无线网络不断发展的需求，地面网络的未来研究聚焦于能源可持续性和网络虚拟化两大方向：能源可持续性旨在优化能耗、降低环境影响；网络虚拟化则致力于提升网络的灵活性和资源管理能力。但目前相关技术的落地仍面临诸多挑战，影响其实际效果和性能发挥，解决这些挑战，对推动无线网络的发展至关重要。

- 能源可持续性。能源可持续性是通信网络发展的关键问题，尤其在移动数据需求持续增长的背景下，这一问题愈发突出。已有多项研究分析了现有系统的局限性，以及融合可再生能源面临的挑战。尽管目前各界正致力于降低能耗、减少碳排放，但多数研究仍聚焦短期解决方案，忽视了长期的可持续性挑战。Israr等[34]强调，地面网络在应对能耗增加、运营成本上升和碳排放加剧等问题时面临巨大挑战，可再生能源虽为解决该问题提供了可行路径，但目前的落地应用不足，仍制约着地面网络的能源可持续性发展。Srivastava等[35]指出，移动数据需求的增长推动了基站数量的增加，进而导致能耗和碳排放上升，这一趋势凸显了未来网络发展中，探索更可持续、更节能的技术路径的迫切性。
- 网络虚拟化。随着新一代移动网络的发展，网络虚拟化的重要性日益凸显。但目前地面网络在落地该技术时面临诸多关键挑战，例如，Condoluci和Mahmoodi [36]指出了现有系统在采用网络虚拟化技术方面的短板，并提出了灵活的网络架构，以提升传统静态系统的资源分配能力和自适应能力。尽管软件定义虚拟化具备诸多优势，但目前多数地面网络仍难以实现其有效落地，这些问题导致网络性能不佳，灵活性受限。

高效的能源可持续性方案和网络虚拟化技术，是地面网络突破基础功能、提升性能的关键：能源可持续性聚焦于优化能耗、降低环境影响，但目前的能源管理不完善、可再生能源融合度低等问题，往往导致运营成本上升、环境影响加剧；网络虚拟化旨在通过虚拟网络资源，提升网络的灵活性和效率，但目前地面网络在落地该技术时面临诸多挑战，导致网络效率低下、运营效果不佳。解决这些问题，对提升网络能力、推动网络可持续发展至关重要。

3.2. 卫星网络的问题梳理

卫星网络因覆盖范围广、轨道高度高的特点，在资源管理和通信可靠性方面面临诸多持续性挑战。表3 [37–52]对这些问题进行分类，并梳理了相应的解决方案。

（1）连接性与稳定性。卫星具有高移动性的特点，因此稳定的连接和网络稳定性是卫星运行的关键。卫星的周期性轨道运动，会导致节点可见性间歇性变化，进而破坏网络拓扑，影响网络整体稳定性；拓扑的变化还要求卫星网络实现资源的实时分配和层间协同，以保障星地融合网络的可靠性。已有诸多研究为解决这些问题提供了可行方案，例如，Shayea等[37]提出了提升低轨卫星系统连接性和稳定性的机制，指出尽管低轨卫星具备固有优势，但仍存在影响通信可靠性的局限性，并在研究中展望了未来的研究方向。Li等[38]提出了提升低轨、中轨、地球静止轨道卫星网络连接性和稳定性的机制，指出卫星的周期性轨道运动会导致节点可见性间歇性变化，增加了维持可靠网络拓扑的难度，同时从空间和时间维度影响网络稳定性。综上，卫星的高移动性给卫星网络的连接性和稳定性带来了巨大挑战：卫星的周期性轨道运动导致其可见性间歇性变化，进而引发网络拓扑频繁变动，破坏通信连续性、降低网络整体性能。因此，提升连接性和稳定性的解决方案，是实现三层卫星网络稳健运行的关键。

（2）安全与隐私。随着卫星网络的发展，其攻击面不断扩大，且实时数据的保护难度增加，安全与隐私问题愈发突出。传统的安全防护手段难以适配卫星通信的开放无线信道、动态网络拓扑等特性；星地融合网络中卫星与地面网络的融合，让加密、访问控制等安全管理工作变得更为复杂。此外，网络拓扑的持续变化、网络层间的实时协同，带来了更多的安全漏洞，进一步扩大了攻击面。随着6G、量子计算、人工智能技术的发展，保障数据完整性、防止未授权访问面临新的挑战，包括敏感数据保护、安全通信实现、网络环境动态适配等方面。同时，物联网和卫星网络中连接设备数量的不断增加，也让安全通信的管理难度大幅提升。已有多项研究指出了卫星和物联网安全面临的这些挑战，例如，Tedeschi等[39]综述了链路层的安全威胁及解决方案，重点关注物理层安全和密码技术，指

表3 卫星网络的问题梳理

Type	Ref.	Objectives	Methods	Restrictions
Connectivity and stability	[37]	Provide reliable communication	Explaining LEO systems and services for support	Connectivity + stability + mobility
	[38]	Ensure the topological connectivity of satellite systems	Investigating security threats and challenges	Periodic movement and intermittent visibility of satellites
Security and privacy	[39]	Enhance the security of satellite communication systems	Investigating security threats and challenges	Increased attack surface + reduced security
	[40]	Achieve smarter and more secure 6G systems	Identifying open issues to inspire further research	Various security threats
	[41]	Enhance the security and privacy of I oT systems	Introducing quantum computing and federated learning	System heterogeneity + resource constraints
Resource management and efficiency	[42]	Achieve efficient resource scheduling	A fitness-based task-resource matching algorithm	Resource scarcity
	[43]	Ensure optimal utilization of interplanetary link resources	A highly effective sequential two-phased heuristic algorithm	Miniaturization + cost reduction
	[44]	Meet the diversified needs of users for satellite ranging	Differential evolution with spatial partitioning and adaptive selection	Task profit + load balancing + timeliness
Scheduling and task management	[45]	Handle real-time dynamic tasks better	An algorithm for improved task allocation and scheduling	Limited number of satellites
	[46]	Maximize the total reward in satellite distance scheduling	A deep reinforcement learning-based heuristic scheduling method	Increased number of satellites + increased customer demands
	[47]	Total profit from scheduled requests + average image quality	A knowledge-transfer-based multi-objective framework	Multi-target scenario + real-time arrival request
	[48]	Achieve efficient inter-satellite link scheduling	A data-driven parallel adaptive large neighborhood search	Number of satellites + constellation size
	[49]	Implement efficient planning for multi-satellite coordinated observation	Decomposing and allocating tasks to satellites for effective execution	Increase in on-orbit satellites
	[50]	Achieve efficient scheduling of satellites	A reinforcement-learning-based genetic algorithm	Many factors affecting electromagnetic detection
Bandwidth and transmission	[51]	Bandwidth aggregation and redundant backup	An integrated multipath network coding transmission scheme	Long delays + frequent failures + poor resource use
	[52]	Maximize utilization and ensure user QoS	Time-varying traffic demands	Time-varying traffic demands + maximizing utilization + ensuring user QoS

出了抗干扰、抗欺骗等关键问题，并展望了未来的研究方向。Zhang等[40]探究了6G系统面临的安全与隐私挑战，分析了传统密码学方法在应对物理层攻击时的局限性，同时综述了机器学习技术在提升6G物理层安全方面的应用，探究人工智能技术的赋能价值。Javeed等[41]指出了6G网络中物联网安全的漏洞，如设备认证、数据加密方面的挑战。

综上，物联网设备数量庞大、卫星网络资源有限，给卫星网络带来了额外的安全风险，尤其在实时通信场景中，这一问题更为突出。卫星网络的发展带来了显著的安全与隐私挑战，传统防护手段难以有效应对，而物联网设备数量的增长，进一步加大了安全通信管理和网络稳定性维护的难度。

（3）资源管理与效率。大型卫星星座的计算、通信等服务的优化，离不开高效的资源管理，卫星网络复杂度的不断提升，对资源的有效分配提出了更高要求。在星地融合网络中，卫星层与地面层相互依存，需要通过实时协同实现资源的高效分配，以保障系统的稳定运行。这些挑战源于卫星层与地面层在时延、数据速率、资源需求等方面的差异，需要通过自适应策略实现性能优化。Wang等[42]提出了一种算法解决卫星测距调度问题，优化卫星运行中的资源分配，强调面对轨道中卫星数量的持续增长，高效的资源管理至关重要。Lin等[43]指出，成像数据量庞大、卫星网络动态性强，给高效的传输资源管理带来了挑战。Wang等[44]探讨了卫星测距调度管理和优化面临的挑战，

指出随着卫星数量的增加和需求的多样化，平衡任务收益、天线资源和任务时效性的难度不断加大。综上，卫星数量的增加和网络流量的动态变化，让卫星网络的资源管理愈发复杂；而全球无缝覆盖、服务不间断的需求持续增长，进一步加剧了卫星资源的压力。高效的资源分配是优化卫星网络运行的关键，尤其在数据量庞大、调度需求多样的场景中，通过提升任务完成效率、平衡天线资源、保障任务时效性，有效的资源管理能够对网络整体性能的提升起到关键支撑作用。

（4）调度与任务管理。高效的调度与任务管理是优化卫星网络性能的核心，与车联网中车辆根据需求选择行驶路径的感知模式类似，卫星也需要高效的任务分配方法。卫星观测调度的管理，需要应对动态任务、优化资源分配，而星间通信能够有效提升调度性能。在星地融合网络中，任务管理需要考虑卫星与地面网络的交互，而动态的任务到达和变化的网络拓扑，给任务管理带来了独特的挑战。

已有多项研究通过构建模型、设计算法应对这些挑战，例如，Li等[45]针对卫星观测调度中的常见动态任务问题展开研究，指出任务到达时间的不确定性、可延迟观测任务数量的增长带来的挑战。Ou等[46]指出，随着卫星数量和客户需求的增加，卫星测距调度问题的难度不断提升，高效的任务分配和调度是维持卫星性能的关键。Wei等[47]指出了观测卫星实时观测请求调度面临的挑战，包括动态任务到达的管理、收益最大化、高影像质量保障等方面。Liu等[48]探究了大型低轨卫星星座中星间链路调度的挑战，核心是管理多颗卫星间的通信，实现高效的数据传输，研究指出了链路调度优化、传输时延降低等关键问题。Song等[49]针对多卫星联合观测规划问题展开研究，重点关注卫星间的任务分配，分析了多卫星间高效分配观测任务、优化任务执行效果的难度，研究凸显了卫星资源管理和任务协同的复杂性。Song等[50]针对电磁探测卫星调度问题展开研究，提出采用混合整数规划模型和基于强化学习的遗传算法，研究强调了探测模式、带宽等影响调度效率的关键因素。

综上，调度与任务管理是优化卫星网络性能的关键，动态任务到达管理、星间通信协同是亟待解决的重要挑战；而星地融合网络中卫星与地面网络的融合，因两层网络在移动性、资源可用性方面存在差异，进一步增加了任务管理的复杂度。任务分配和同步的实时协同是关键，若处理不当，极易导致时延增加、效率降低，进而影响卫星网络的整体运行效果。因此，解决这些问题，对保障网络最优性能、实现任务目标至关重要。

（5）带宽与传输。随着卫星网络的扩张，资源分配的复杂性不断提升，高效的带宽与传输管理成为核心需求。传统方法难以解决传播时延过长、连接故障频繁等问题，制约了带宽管理的效率，导致资源利用不佳，降低网络整体性能。此外，6G中的多波束卫星（MBS）给带宽分配和服务质量保障带来了挑战，随着流量需求的增长，资源优化的难度进一步加大。

已有多项研究指出了上述问题，强调需要通过先进策略提升卫星网络的带宽和传输效率，例如，Ouyang等[51]针对大型动态低轨卫星网络的带宽和传输挑战展开研究，首先明确了影响网络性能的关键问题，包括传播时延过长、连接故障频繁、资源利用低效等；随后分析了这些问题对数据传输的影响，指出时延会降低传输速率，连接故障会中断通信。此外，Ouyang等[51]还指出资源利用低效会造成带宽和缓存资源的浪费，研究明确了提升卫星通信系统数据传输效率、降低时延的关键方向。Ma等[52]探究了未来多波束卫星网络的带宽和传输挑战，多波束卫星网络是SAGIN支撑6G的核心，研究指出了在保障用户服务质量的前提下，高效、动态分配稀缺的带宽频谱资源的难度，并强调随着多波束卫星网络的扩张，时变流量需求的管理、资源利用效率的提升的复杂度不断加大，解决这些问题对大型多波束卫星通信系统的有效运行至关重要。

综上，卫星网络的带宽和传输效率对系统整体性能影响显著，而星地融合网络中卫星与地面网络的融合，因两层网络在覆盖范围、通信特性方面存在差异，进一步增加了带宽管理的复杂度：卫星网络覆盖范围广，但传播时延长；地面网络则实现本地化的高速连接，二者在数据流向协调、带宽分配方面的协同难度大，尤其在流量需求动态变化、卫星网络链路状态不稳定的场景中，这一问题更为突出。传播时延长、连接故障频繁等问题，会严重影响数据传输速率和可靠性，高时延、通信中断会降低数据吞吐量，同时增加多波束卫星网络流量管理的难度。因此，有效解决这些问题，对保障大型卫星网络的高性能、高可靠性运行至关重要。

3.3. 星地融合网络挑战的现有解决方案

本节对卫星网络中应用的核心技术进行分类和梳理，分析其基础性能和未来发展方向。先进的调制、纠错、资源分配等技术，能够提升频谱效率、吞吐量，降低时延，同时增强安全性；以人工智能和机器学习为支撑的传统频谱利用方案，能够优化频谱分配；此外，正交时频空调制等技术，能够提升频谱效率，解决误码率问题。

随着低时延、高吞吐量服务需求的增长，增强型移动

宽带与超高可靠低时延通信的共存机制成为研究重点，这类机制能够平衡超高可靠低时延通信严苛的时延和可靠性要求，尤其适用于触觉互联网等实时性应用。基于量子的解决方案、动态信任算法等技术，能够实现端到端的安全防护，但连接设备数量的增加扩大了攻击面，导致安全挑战持续存在。人工智能驱动的自动化和智能编排技术，是优化网络可靠性、可用性和资源管理的关键，能够提升网络效率，同时改善多设备连接、流量动态变化场景下的决策能力，尽管目前存在时延、资源有限等问题，但人工智能驱动的自动化技术为提升网络可靠性带来了巨大潜力。

地面网络的未来发展，需要聚焦可持续性、能源效率和网络虚拟化：可再生能源管理、绿色通信技术旨在降低碳排放和能耗；网络虚拟化则实现硬件与网络功能的解耦，提升5G各类应用的灵活性和可编程性。

在星地融合中，拓扑维护、网络维护、编排传输等多种技术协同作用，构建起一体化的通信系统，图4展示了这三类技术的关联关系。具体而言，拓扑构建中采用的时变时空模型，能够提升动态卫星网络的连接性，为有效的拓扑维护提供支撑；联邦学习技术能够实现安全预警，是保障网络稳定性的关键；启发式算法和强化学习算法能够实现传输的高效编排，优化资源调度和实时任务管理。下文将对这些领域进行深入分析，梳理现有解决方案及其局限性。

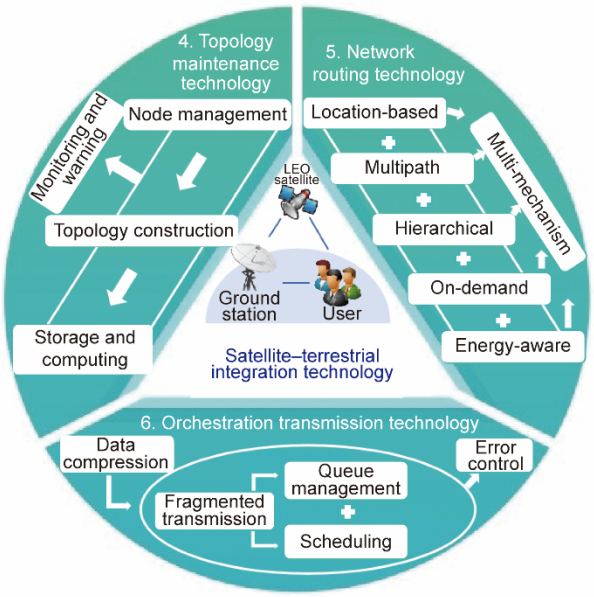

图4. 星地融合核心技术分类示意图。

星地融合网络实现了卫星与地面网络的高效资源共享和负载均衡，能够提升网络容量的利用率，在高需求、网络拥塞场景中，这一优势尤为突出：当其中一层网络出现拥塞或故障时，另一层网络能够无缝接管，保障服务的连续性，最大限度减少停机时间。在资源优化方面，卫星与地面网络能够实现带宽的动态共享，根据实时的需求和网络状态调整分配策略；在故障恢复方面，两层网络的优势互补能够实现流量的快速重路由，依托可用的基础设施保障网络稳定性。星地融合网络中部署的流量管理策略，能够对关键数据流进行优先级划分，优化带宽利用，这种协同模式确保了即使在流量高峰时，自动驾驶、实时通信等对时延敏感的应用也能获得充足的资源，进而让整个系统的抗毁性大幅提升，能够适配动态的网络环境，在各类运营场景中维持最优性能。

4. 拓扑维护技术

本节梳理卫星网络拓扑管理的相关研究，并根据研究涉及的卫星网络层数（单层或多层）进行分类。星地融合网络的有效拓扑管理，需要实现卫星与地面组件的无缝融合，但卫星网络的动态拓扑、复杂的网络结构，以及卫星-地面切换等频繁的层间协同，给星地融合网络路由效率的提升和服务连续性的保障带来了巨大挑战。为解决这些挑战，Li等[53]提出了虚拟覆盖网络技术，实现与地面网络的顺畅交互，该方法能够让星地网络组件有机融合，为整体的拓扑管理提供支撑。表4 [54–65]梳理了拓扑管理的相关细节，包括研究目标、提出的方法和局限性。

4.1. 节点管理

有效的节点管理是维持卫星网络整体拓扑、保障网络顺畅运行的关键，节点管理技术的进步，对解决拓扑动态变化等挑战至关重要。研究人员已提出多种策略，提升卫星网络节点管理的性能、稳定性和效率，保障卫星网络的最优运行，这些策略往往结合卫星网络的具体配置和需求，采用先进的算法和模型。单层卫星网络和多层卫星网络的节点管理存在核心差异：单层网络的节点管理聚焦于节点部署和连接性维护，以保障拓扑稳定；多层网络则优先通过节点聚类和层间交互优化，提升网络性能。

（1）单层卫星网络。Xu等[54]针对星地融合场景，提出了一种感知拓扑的节点管理方法，通过时隙划分技术对卫星节点进行动态分类，优化节点功能，提升缓存效率和资源利用率。Vergoossen等[55]为可信节点量子密钥分发（QKD）网络构建了星座模型，重点关注拓扑维护，在节点管理方面，利用低轨量子密钥分发卫星实现与地面站的密钥缓存，提升密钥分发效率；同时采用地球静止轨道中继卫星，实现密钥组合的安全传输。此外，研究还评估了

通过星间量子密钥分发链路实现密钥均衡的节点管理方法，重点关注单层网络约束下的网络拓扑维护。

（2）多层卫星网络。与单层网络主要通过节点部署等方式维护拓扑不同，多层卫星网络的节点管理因网络复杂度提升，优先通过节点聚类提升网络性能，其核心挑战是优化不同网络层间的交互，这需要复杂的协同和资源分配策略。近期的研究方法愈发注重融合节点聚类和社会属性，进一步提升网络性能，例如，Cong等[56]提出了一种基于卫星交互的节点聚类方法，以提升路由性能，该方法利用卫星的社会属性，提升消息传输效率，同时实现对网络状态变化的动态适配。这种聚类技术结合了空间和社会动态特性，能够大幅提升多层网络配置下的运行效率。

4.2. 拓扑构建

拓扑构建定义了网络的整体结构，而节点管理则聚焦于单个节点的维护。卫星网络的规模化发展和性能需求的提升，让拓扑构建的优化成为关键，其复杂度也不断加大。研究人员已设计多种策略优化卫星网络的拓扑构建，核心目标是提升网络的效率、稳定性和自适应能力，主要方法包括先进的路由算法、动态链路调整技术、自适应网络模型等。单层卫星网络和多层卫星网络的拓扑构建存在核心差异：单层网络聚焦于单轨道层内的连接性优化；多层网络则通过跨层的通信和流量管理提升网络整体性能和冗余度。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的拓扑构建，重点是优化单轨道层内的网络连接性，保障网络稳定性。Wang等[57]聚焦星地融合的拓扑构建优化，提出了并行仿真架构，实现高效的拓扑划分，其核心方法包括资源评估算法、基于负载均衡的划分算法和时间片算法，大幅提升了仿真效率，实现了仿真性能的显著优化。Korçak和Alagöz [58]针对对地静止低轨卫星系统的拓扑构建展开研究，提出了多状态虚拟网络（MSVN）架构，解决传统虚拟节点方法的缺陷，构建了多状态虚拟网络的数学模型，并设计了高效的切换机制。实验结果表明，基于多状态虚拟网络的系统相比传统虚拟节点系统具备显著优势。

（2）多层卫星网络。与单层网络不同，多层卫星网络融合了多轨道层的卫星，能够提升通信、流量管理能力和网络冗余度，但额外的轨道层也带来了新的挑战，即需要协调不同轨道的卫星，保障层间的数据流畅通。Chen等[59]

表4 拓扑维护技术梳理

Type	Multilayer	Ref.	Objectives	Methods	Restrictions
Node management	No	[54]	Enhance caching effectiveness	A hybrid caching strategy based on node classification	High-speed satellite movement + dynamic topology
	No	[55]	Secure communication with low latency	Constructing a key buffer using trusted satellite nodes	Network model coverage area
	Yes	[56]	High delivery rate + low latency + low network overhead	A routing algorithm based on node clustering	A large number of satellite nodes
Topology construction	No	[57]	Improve simulation efficiency of satellite network	Parallelism through network topology partitioning	Computer hardware capabilities + software performance
	No	[58]	Enhance satellite handover efficiency	Polymorphic virtual network architecture based on topology	High mobility of network nodes
	Yes	[59]	Maximize data transmission from LEO satellites	A partitioning method based on interlayer relationships	Short satellite–terrestrial communication time
Storage and computing	No	[60]	Provide computing services in remote areas	Deploying mobile edge computing servers	Limited battery capacity of ground terminals
	No	[61]	Enhance sensing + communication + computing	Processing sensor results at the edge or cloud via satellite	Balancing between resources and performance
	Yes	[62]	Higher task-completion rate and reward rate	A novel edge computing framework	Extensive solution space
Monitoring and warning	No	[63]	Improve the robustness of satellite networks	Local-state routing algorithm	Constellation size
	No	[64]	Traffic engineering + fast rerouting	Effectively recoverable segment routing	Rapid satellite movement
	Yes	[65]	Enhance network topology robustness	Various optimization algorithms	Scalability + resource constraints + security issues

聚焦星地融合的拓扑构建，提出了三层网络架构，融合低轨-地面站链路和地球静止轨道中继卫星，提升数据传输效率；该方法采用非均匀时隙划分技术应对拓扑的动态变化，同时利用斯塔克尔伯格博弈模型优化数据传输策略，相比现有技术，该方法能够显著提升数据传输量和效率。

4.3. 存储与计算

SAGIN的运行离不开各类资源的支撑，计算、存储、通信等资源是处理海量数据的关键，通过资源分配优化，能够提升数据处理效率、降低能源成本。单层卫星网络和多层卫星网络的资源分配存在核心差异：单层网络聚焦于单轨道层内组件的资源优化；多层网络则需要通过跨层协同，实现不同网段的资源优化。具体的资源分配方法如下。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的资源分配，核心是优化单轨道层内单个网络组件的资源配置，提升运行效率。Li等[60]针对低轨卫星边缘计算网络的能耗最小化问题展开研究，重点关注计算任务的卸载，以及电池受限地面终端的资源优化；为提升存储和计算效率，提出了多智能体深度强化学习算法，通过去中心化的方式优化发射功率、中央处理器频率、数据分配、卸载决策和带宽管理，该算法在能耗方面的表现优于随机分配、近端策略优化、深度确定性策略梯度等方法。Zhu等[61]针对星地融合网络的存储和计算资源进行优化，提升任务卸载效率，通过结合子帧分配和任务划分技术，将任务分配至本地设备、边缘节点和云端，提升资源利用率。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络涉及多个轨道层，资源分配的复杂度大幅提升，需要通过层间协同实现不同网段的资源优化。He等[62]为敏捷卫星系统提出了边缘计算框架，优化存储和计算资源，该方法首先在中心节点对任务进行筛选，随后基于剩余任务密度，采用构造性启发式算法在边缘节点进行任务调度；相比其他先进技术，该方法的任务完成率和收益更高，同时计算耗时保持在合理水平。

4.4. 监测与预警

监测与预警系统是维持卫星网络拓扑稳定性和抗毁性的关键，能够提前发现潜在的故障、安全威胁和资源过载问题，及时采取干预措施，防止网络性能下降。在卫星网络中，监测机制对链路状态和数据传输完整性进行实时跟踪，保障服务的连续性，对监测到的问题进行实时响应，是维持拓扑稳定以及快速应对定向攻击、系统故障等问题的核心。单层卫星网络和多层卫星网络的监测与预警系统存在核心差异：单层网络主要聚焦于单个卫星和链路的抗毁性；多层网络则需要通过多轨道层的协同监测，应对层间交互带来的复杂性。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的监测与预警系统，重点是保障单轨道层内单个卫星和链路的抗毁性，核心目标是及时发现网络中的干扰或故障并快速响应，最大限度降低影响。Xu等[63]探究了卫星星座网络应对攻击的抗毁性，定义了两种鲁棒性指标：一种评估攻击对卫星和链路的影响，另一种则考虑资源分配因素；通过对多种攻击策略的测试，发现选择性攻击的危害最大，同时研究指出，大型星座的抗毁性整体更强，但在定向攻击下会更快崩溃。这些结果凸显了构建有效的监测与预警机制、提升网络抗毁性的迫切性。Zhang等[64]利用分段路由技术，解决低轨星座的监测与预警问题，提出了时延受限的流量分割算法，通过无环备用路径实现负载均衡和故障恢复的优化。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络涉及多个轨道层，监测与预警系统的复杂度大幅提升，因此需要采用跨层协同的方式，结合层间通信和一体化监测机制，应对叠加的挑战。Changazi等[65]综述了提升物联网系统拓扑鲁棒性的优化技术，分析了设备互联的复杂性，探讨了粒子群优化、遗传算法等算法，指出了可扩展性、安全性等关键挑战，同时强调了标准化的必要性；研究提出了提升智慧城市、医疗领域监测与预警系统性能的方法，核心是构建鲁棒的网络拓扑。

5. 网络路由技术

本节梳理网络路由技术的最新研究成果，并根据研究是否聚焦多层卫星网络进行分类。星地融合网络的发展，核心是实现卫星与地面层的无缝交互，其中卫星与用户设备（UE）之间的数据上下行传输是关键[66]。卫星星座与地面网络的协同和优化利用，能够有效保障路由和任务的传输，适配动态的移动性和间歇性的网络连接[67]。尤其重要的是，地面站数量的增加带来了网络复杂度的提升，同时卫星服务质量要求存在诸多限制，层间的高效协同是应对这些挑战的核心[68]。表5 [69–85]梳理了各类路由技术的研究概况，包括研究目标、方法和局限性，下文将对具体的路由技术类别进行介绍。

5.1. 基于位置的路由

在基于位置的技术领域，单层和多层卫星网络的路由技术研究重点存在差异：单层网络的研究聚焦于单轨道层

内的自适应能力优化和传输成本降低；多层网络则强调跨多轨道层的卫星切换优化和信令开销减少，下文将对这些差异进行详细阐述。

（1）单层卫星网络。Tian 和 Hu [69]针对带推荐卫星的二级位置路由问题展开研究，提出了鲁棒的列生成算法，提升城市物流场景下的网络自适应能力。An [70]针对生物质运输中封闭式-开放式卡车与装载机的路由问题，构建了混合整数线性规划模型，同时提出了基于构造性启发式的方法，降低从卫星存储点到生物能源工厂的运输成本。Crainic 等[71]提出并验证了二级车辆路由问题框架，融合基于位置的分析实现卫星部署优化，该框架利用卫星位置规则和客户分布优化路由，降低全球配送成本。

（2）多层卫星网络。随着技术的进步，多层卫星网络的位置管理和跨层通信方法不断优化，其路由研究重点也转向应对多轨道层的复杂性，需要更先进的技术实现高效的卫星切换和信令开销降低。Du 等[72]针对混合低轨/中轨巨型卫星网络，提出了基于双位置区的分布式位置管理方法，通过基于位置的策略优化卫星切换、减少信令开销，进而提升网络效率，该方法能够解决多卫星层间的切换协同难题，提升通信效率。

5.2. 多路径路由

多路径路由技术能够提升数据传输的效率和可靠性，在拓扑动态变化、通信需求多样的卫星网络中尤为重要。

表5 网络路由技术梳理

Type	Multilayer	Ref.	Objectives	Methods	Restrictions
Location-based	No	[69]	Improve efficiency + reduce operational costs	Adjusting satellites based on customer location and demand	Expanded distribution range + urban development
	No	[70]	Minimize total costs	A heuristic method that considers satellite storage locations	Multiple trips + multiple visits + synchronized loading
	No	[71]	Reduce overall routing costs	A study on the impact of instance parameters on global costs	Parameters including satellite positions
	Yes	[72]	Reduce management overhead and latency	A solution for location management technology	Dual mobility of satellites and users
Multipath	No	[73]	Improve transmission efficiency	A multipath routing strategy based on software-defined networking	Network congestion + transmission delay
	No	[74]	Improve load balancing + enhance QoS	A multipath routing algorithm	Network scale expansion
	No	[75]	Reduce energy consumption	A computational dependency multipath routing paradigm	Latency
	Yes	[76]	Reduce the number of interlayer link switches	A multipath routing algorithm based on ant colony optimization	QoS requirements
Hierarchical	No	[77]	Promote the forwarding efficiency of constellations	An information-centric routing scheme	Satellite mobility
	No	[78]	Reduce packet loss + lower latency	A load-aware hierarchical routing protocol	Topology dynamics + continuous traffic variations
	Yes	[79]	Meet diverse QoS requirements	A local info-based multi-objective reinforcement learning strategy	Ultra-dense + high-dynamic + large-scale
On-demand	No	[80]	Provide high-performance bandwidth services	A new paradigm called “demand islands”	Transient high-rate changes in network topology
	No	[81]	Help data routing from the source to the destination	A location-assisted on-demand routing protocol	Variations in link costs
	Yes	[82]	Reduce convergence time and end-to-end latency	An on-demand routing-based protocol	Search area + computational cost
Energy-aware	No	[83]	Balance energy usage	An energy-aware routing algorithm	Service delay requirements
	No	[84]	Avoid excessive discharge of satellite batteries	Adding energy routing planning and energy routing methods	Battery charge and discharge amount
	Yes	[85]	Maximize network energy efficiency and user acceptance	An efficient heuristic method	Complex traffic load + QoS requirements

通过多路径传输，网络能够实现负载均衡、保障服务质量，进而提升抗故障能力。单层和多层卫星网络的多路径路由研究重点存在差异：单层网络聚焦于资源利用优化和时延降低；多层网络则强调层间通信的管理和路由优化。

（1）单层卫星网络。Qi等[73]为卫星网络提出了基于软件定义网络（SDN）的动态多路径路由策略，该策略综合考虑时延、带宽和节点负载，实现路由的实时调整，提升传输效率，同时平衡带宽消耗。基于低轨卫星网络的发展，Liu等[74]提出了多路径路由算法，优化服务质量和负载均衡，通过改进的聚类结构实现流量的高效分发，降低传输时延。Wang等[75]为星地融合网络提出了依赖计算的多路径路由（CDMR）范式，通过将任务映射至多路径路由，在满足时延约束处理要求的同时优化能耗。单层卫星网络的多路径路由挑战，主要集中在拓扑受限场景下的资源利用优化和时延降低。

（2）多层卫星网络。Yang和Yao [76]为软件定义卫星网络（SDSN）提出了基于蚁群优化的多路径路由算法，优化层间链路切换算法以减少切换次数；该方法利用全局拓扑信息计算多条独立路径，增加数据传输的选择，提升网络安全性。多层卫星网络的多路径路由复杂度，源于不同卫星层间的交互管理和跨层路由优化。

5.3. 分层路由

星地融合网络中的分层路由技术采用双层架构，将卫星和地面网络划分为独立的层级，各层级内实现路由优化：卫星层负责星间和星地通信，地面层则管理用户连接。单层和多层卫星网络的分层路由研究重点存在差异：单层网络聚焦于相对同构环境下的路由优化；多层网络则强调层间通信复杂性的应对和多样化服务需求的满足。

（1）单层卫星网络。Yan等[77]为大型低轨卫星网络提出了基于逻辑路径标识的分层路由方法，将星座划分为多个分组，并设计路径标识实现高效路由，大幅提升了数据包投递率。有学者提出了感知负载的分层信息中心路由协议[78]，以提升大型低轨卫星网络的路由性能，该协议能够有效应对拓扑动态变化和流量波动。单层卫星网络的分层路由，重点是在通信路径类型有限的情况下，优化资源分配、保障运行效率。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络的分层路由挑战，源于不同卫星层间的复杂交互，难以保障不同高度、不同通信能力的卫星间的无缝通信。有学者为超密集自由空间光低轨卫星网络提出了分层路由策略[79]，采用双层网络架构，融合中轨和低轨卫星，通过区域网络划分提升路由效率、降低复杂度；同时提出了基于多目标强化学习的路由策略，以满足地面各类应用的差异化服务质量需求。多层卫星网络的分层路由，重点是管理层间通信、优化异构卫星间的路由，同时满足多种服务的差异化服务质量需求。

5.4. 按需路由

本节探究卫星网络中的按需路由策略，重点分析其在拓扑动态变化场景下的自适应能力。卫星配置的多样性和动态性，让这类策略成为提升数据传输效率的关键。按需路由能够根据卫星移动频繁、连接性多变的动态网络环境，优化数据传输路径的自适应能力。最新研究表明，按需路由方法能够通过根据网络状态调整路由，降低时延、提升吞吐量。单层和多层卫星网络的按需路由的研究重点存在差异：单层网络聚焦于相对简单、同构环境下的高效路由；多层网络则强调层间通信的管理和卫星层异构性的适配。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的按需路由策略，重点是在相对同构的环境下，适配卫星拓扑的动态变化，主要应对卫星移动频繁、单卫星层拓扑相对简单场景下的高效路由挑战。Markovitz和Segal [80]为低轨卫星网络提出了需求岛路由方法，将服务区域划分为多个地理区域，每个区域的中心设置一个网关，卫星实现对所有区域的覆盖，将路由的计算成本控制在常数阶[$O(1)$]；该方法支持实时多路径路由，同时能够高效管理带宽、时延和卫星切换。Papapetrou等[81]为低轨卫星网络提出了基于位置辅助的按需路由协议，首次将按需路由技术应用于卫星网络研究，旨在优化数据传输；通过多种链路成本指标对协议进行评估，仿真结果表明，该协议的性能优于集中式方法。单层卫星网络的按需路由，重点是在路径选择有限、复杂度较低的场景下优化路由效率。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络的按需路由挑战，包括层间路由管理、不同轨道卫星间的流量优化，以及各层通信能力差异的考量。Ji等[82]为分层的低轨和中轨卫星网络，提出了基于A星算法的按需路由（ASOR）协议，采用改进的A星算法缩小搜索范围、降低计算成本；通过按需计算最优路径，该协议能够在不考虑故障节点的情况下保障路由最优，仿真结果表明，相比全局最短路径协议，该协议在收敛时间和端到端时延方面表现更优。多层卫星网络的按需路由，重点是优化异构层间的星间通信，同时让路由能够适配拓扑变化和星间链路质量的波动。

5.5. 能量感知路由

本节梳理卫星网络中能量感知路由策略的相关研究，

低轨卫星面临电池容量有限、流量分布不均的挑战，因此，能量感知路由的研究目标是延长卫星寿命、降低能耗，同时保障网络性能。能量感知路由方法通过考虑太阳能电池板输出、地球遮挡、流量需求等因素，在保障服务质量的前提下优化功耗。最新研究聚焦于多层卫星网络的节能资源分配，实现流量和能耗的优化。单层和多层卫星网络的能量感知路由的研究重点存在差异：单层网络聚焦于单卫星层内的能耗降低和流量均衡；多层网络则强调异构层间的能耗协同和流量优化。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的能量感知路由挑战，主要是卫星能源资源有限的管理和卫星间的流量分布均衡。Yang等[83]针对低轨卫星网络因电池容量有限、流量分布不均导致的能耗枯竭问题展开研究，提出了可用能量路由算法，基于太阳能电池板输出和地球遮挡造成的能耗构建卫星能量模型；该算法根据服务时延需求选择路由路径，在保障服务质量的同时降低能耗，数值结果表明，该算法能够使能耗降低12.53%，数据包丢失率降低23.72%。Macambira等[84]为延长卫星寿命，探究了低轨卫星网络的节能路由技术，提出了两种路由方法，通过优化流量降低电池放电深度（DOD），分别为能量路由剪枝（ERU）-放电深度法和能量路由惩罚（ERA）-放电深度法，当电池电量过低时，通过剪枝或惩罚链路的方式防止过放电。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络的能量感知路由挑战，包括不同卫星层间的能耗协同、流量路由优化和层间通信管理，节能资源分配是其核心需求。该领域的研究多聚焦于优化用户关联、流量路由和网络功能部署，以提升整体性能。Mesodiakaki等[85]通过构建混合整数线性规划模型应对这些挑战，目标是在处理复杂网络约束的同时，最大化能源效率和用户接受率。

6. 编排传输技术

本节梳理编排传输的相关研究，重点分析单层和多层卫星网络研究重点的差异：单层网络的研究主要聚焦于路由和调度优化，通过数据压缩、队列管理提升效率；多层网络则探究跨层交互，强调异构卫星配置下的资源分配和差错控制。有研究指出[86]，实现两层网络的协同，进行有效的资源编排，是保障服务传输的关键，尤其适用于传输距离远、时延要求高的超远程实时应用。卫星网络在数据下行至地面网络进行后续应用前，会完成必要的星上处理，最终保障服务的持续支撑。具体而言，网络的异构性和内部节点的移动性，让面向服务传输的有效资源编排面临诸多挑战。表6 [43,87–101]梳理了相关文献，清晰呈现编排传输挑战的潜在解决方案。

6.1. 数据压缩

本节探究卫星网络中与数据压缩相关的研究，重点关注数据传输编排中的应用，有效的数据压缩能够提升传输效率、降低带宽占用。单层和多层卫星网络的数据压缩的研究重点存在差异：单层网络聚焦于同构结构下的路由和资源利用；多层网络则需要关注层间交互，保障数据的流畅传输。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络数据压缩的主要挑战，包括卫星间能源和缓存容量的差异性管理，以及数据传输速率的优化。Wang和Chin [87]构建了混合整数线性规划模型，以最小化小卫星向地面站的数据下载时间，该模型重点解决能源和缓存约束多变的问题，融合路由、链路调度和数据聚合速率优化技术，通过网络数据聚合将总下载时间缩短了52%~84%。Zhang等[88]为卫星网络提出了数据采集和监测方案，利用扩展伯克利包过滤技术实现数据的实时采集，同时采用极大极小公平算法优化路由，大幅提升了数据传输效率。单层卫星网络的数据压缩，重点是在同构卫星结构下优化路由和资源分配。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络数据压缩的主要挑战，包括各卫星层间的交互管理、跨层数据传输路径的优化，以及卫星间数据的无缝流转保障。Parkes等[89]提出了Hi-SIDE项目，旨在为未来的地球观测和通信系统研发卫星数据链技术，研究重点是实现SpaceFibre技术的落地以及不同卫星配置下数据链组件的互联，提升数据传输能力。

6.2. 分片传输

分片传输技术通过将大数据包拆分为小分片，解决卫星网络中大数据包的传输挑战，与主要应对带宽限制的传统分段技术不同，该技术是针对卫星网络高时延、动态拓扑等独特性质设计的。通过将数据拆分为小单元，分片传输能够降低数据包丢失率、提升带宽效率，保障复杂、动态网络环境下的数据可靠传输。单层和多层卫星网络的分片传输的研究重点存在差异：单层网络聚焦于时延降低和协议效率提升；多层网络则强调不同卫星类型的融合和切换优化，以降低时延。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络分片传输的挑战，包括转发时延的最小化，以及高时延场景下传输协议的性能衰减问题，研究重点是在单卫星类型的约束下提升协议效率和数据处理能力。Diao等[90]为支撑低轨卫星网络中

表6 编排传输技术研究梳理

Type	Multilayer	Ref.	Objectives	Methods	Restrictions
Data compression	No	[87]	Minimize satellite-to-ground station download time	Introducing mixed-integer linear programming	Different satellite energy + buffering constraints
	No	[88]	Improve satellite bandwidth utilization	A novel data collection and monitoring scheme	Time-varying characteristics
	Yes	[89]	Increase efficiency and reliability of data transmission	Data link elements connect via the SpaceFibre	Demand for next-generation data-intensive missions
Fragmented transmission	No	[90]	Reduce end-to-end latency	A fragment forwarding method in named data networks	Limited maximum transmission unit of the link
	No	[91]	Improve transmission control protocol performance on GEO satellites	A segment-based transmission protocol with majority decoding	Severe damage to ground communication systems
	Yes	[92]	Improve handover success rate + reduce handover frequency	A method for batch ephemeris updates and fast handovers	Signaling overhead
Queue management	No	[93]	Increase packet transmission success	Markov chain model considering queue length	Airborne resources
	No	[94]	Reduce latency between source and destination	Comparing delays in retransmission and encoding	Packet arrival distribution
	Yes	[95]	Investigate the relationship between link inactivity and buffer status	Model the acquire-store-forward process as a queue	Intermittent connections of satellite links
	Yes	[96]	Accurately evaluate satellite network performance	Queueing analysis of SDSNs	Coarse control + long delays + low efficiency
Scheduling	No	[43]	Ensure data integrity	A new heuristic method called mission residual volume factor	Miniaturization + cost
	No	[97]	Improve satellite integration scheduling efficiency	A model considering data transmission	Limited satellite data storage capacity
	Yes	[98]	Improve work efficiency and task completion rate	A model considering data breakpoint transmission	Growing data transmission demand
Error control	No	[99]	Reduce positioning error caused by the simulator	A delay parameter-leading simulation control method	Time-varying parameters of the transmission channel
	No	[100]	Minimize wireless errors on transmission control protocol performance	A threshold-based transmission control protocol	Misinterpreted as congestion loss
	Yes	[101]	Lower the packet error rate	Error model used for simulation purposes	Interaction among coding, framing, and reconstruction

的大数据包传输，探究了低时延分片传输技术，提出了分片的直接转发和复用方法，通过降低转发时延提升传输效率，同时实现缓存分片的有效复用；与传统传输方法相比，该方法能够避免重传时延带来的问题。Wiedmeier和Tyrer [91]为地球静止轨道卫星提出了新型传输层协议，保障数据的可靠传输，该方法采用结合多数解码的多段传输技术，解决传输控制协议（TCP）的性能衰减问题。这些分片传输方法通过减少数据包丢失、优化带宽利用、适配卫星网络的高时延和动态特性，提升了传输的可靠性，降低了时延。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络分片传输的设计重点，是实现不同卫星类型的无缝融合，同时应对异构系统固有的信令和切换复杂性。Huang和Xia [92]提出了一种卫星组网方法，支持星历的批量更新和快速切换，通过将卫星划分为多个集群并设置集中控制器，减少星地交互和信令开销，让用户设备能够依托集中式星历数据做出切换决策；因此，用户设备无需发送测量报告或接收切换指令，相比依赖实时更新的传统方法，该方法能够提升切换成功率，降低时延。

6.3. 队列管理

队列管理技术通过实时流量动态调整队列长度，降低时延，提升吞吐量，由于网络结构和运营复杂度的差异，单层和多层卫星网络的队列管理在挑战、设计考量和技术

路径方面存在显著不同。单层网络的队列管理聚焦于拥塞控制和时延降低；多层网络则强调层间交互的处理和异构卫星类型下的队列管理优化。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络的队列管理需应对拥塞管控难题，降低高流量负载引发的时延。Feng等[93]通过马尔可夫链对用户队列动态建模，提出了波束跳变下的队列管理框架，研究发现，接近饱和状态时，确定性波束跳变策略相比概率性策略，能实现更低的用户时延。Barbero和Ytrehus [94]研究了卫星信道上双向单播通信的协议时延，其研究结果揭示了数据包编码对通信效率的影响。这些解决方案表明，在运行条件相对统一的场景下，亟须对数据包管理进行优化。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络的队列管理面临诸多挑战，包括间歇性链路的管控、不同高度卫星间的交互协调，以及层间数据转发带来的时延解决。Zhu等[95]采用限时M/G/1模型分析了卫星间歇性链路中的队列管理问题，该方法突破了传统排队模型的局限，为编排传输中的队列动态特性研究提供了新视角。Li等[96]为软件定义卫星网络提出了一种分析模型，以优化编排传输中的队列管理，他们将开放流技术融入传统卫星通信，解决了其效率低下的问题。该研究团队利用杰克森定理，对控制器与转发节点间的交互以及存储转发过程进行建模。这些方法均凸显了一个核心要点：需管控层间交互的复杂性，保障不同类型卫星间队列动态的高效性。

6.4. 调度

高效的调度方法能在满足数据实时传输需求的同时，实现卫星资源的高效利用，这类方法通常依托复杂的算法和模型，可动态适配多变的运行条件。单层网络的调度聚焦同构网络内的资源分配优化和任务优先级划分，多层网络则侧重跨层任务协调，管控层间通信时延。

（1）单层卫星网络。单层卫星网络调度的核心挑战为，在同构网络环境中管控时延敏感型任务，高效利用有限的网络资源。Lin等[43]基于时变图模型，提出了适用于低轨卫星海量成像数据的调度方法，该算法分为两个阶段：第一阶段优化接触规划，第二阶段通过线性规划制定传输调度方案。Wen等[97]针对对地观测卫星的观测与传输任务，开展了一体化调度研究，其构建的时间连续模型融合了两类任务，并采用混合演员-评论家（actor-critic）强化学习方法实现高效调度。这些方法均体现出，在结构相对简单的网络拓扑中，需兼顾任务优先级划分与资源分配的平衡。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络调度的关键挑战包括跨层任务协调、层间通信时延管控，以及动态环境下的资源分配优化。随着天基数据传输的复杂性不断提升，高效的任务调度成为核心需求。Chen等[98]针对跟踪与数据中继卫星，提出了一种任务调度方法，以应对日益增长的天基数据传输需求。为提升调度效率，该研究团队定义了任务调度模型，并设计了两阶段方法来生成高质量的初始解，该方法能对初始解进行优化，避免陷入局部最优，从而提升任务完成率和资源利用率。这类解决方案表明，在多层网络场景下，需解决层间交互的复杂性问题，保障任务的无缝执行。

6.5. 差错控制

为修正数据传输过程中的编码错误，差错控制技术成为卫星网络领域的研究热点，已有多项研究聚焦编码技术、差错检测与纠正策略以及性能优化。单层网络的差错控制主要解决同构网络中的时延和性能问题，多层网络的差错控制则侧重管控动态差错，处理层间交互带来的相关问题。相关研究成果详述如下。

（1）单层卫星网络。在结构相对简单、环境同构的单层卫星网络中，差错控制策略主要应对长传播时延和有限带宽带来的挑战，核心目标是在简化的网络拓扑中，降低误码率并实现资源的高效利用。Li等[99]在全球导航系统中引入时延参数，提出了一种仿真控制方法，以最小化定位偏差，这一改进对保障卫星通信中编排传输的可靠性至关重要。Teng和Chang [100]针对卫星信道的长往返时延问题，提出了一种基于阈值的传输控制协议扩展方案，该方案能避免传输控制协议将数据损坏导致的丢包误判为拥塞丢包。大量实验结果表明，该基于阈值的传输控制协议扩展方案有效降低了信道误码率。这些技术均聚焦于解决时延引发的各类问题，优化单层网络场景下的通信性能。

（2）多层卫星网络。多层卫星网络具有异构特性，涉及层间数据传输和多样的运行条件，其差错控制技术更为复杂，核心挑战包括管控层间交互、光链路中断以及复杂环境变化带来的动态差错模式。Friedrichs和Wertz [101]对由地球静止轨道中继卫星和低轨卫星构成的多层卫星网络展开研究，低轨卫星的宽带数据通过激光星间链路传输至地球静止轨道中继卫星，该中继卫星作为再生中继器，采用自由空间光通信技术完成数据转发。为解决微振动对光链路的影响，研究团队构建了时变离散时间模型来模拟差错模式。这类方法表明，在多层卫星网络中，需充分考虑卫星层间交互与环境因素的相互作用。

7. 应用场景

近年来，星地融合网络在各领域的应用不断拓展，本文将对其应用场景及相关研究进行综述，并将主要应用场景划分为交通、金融、工业生产和应急救援四大领域。

7.1. 交通领域

星地融合网络为交通领域的监测、数据卸载、资源分配和互联互通问题提供了解决方案（图5），本节将探讨各实际应用中面临的挑战及相关技术。

（1）监测管理。遥感技术在提升交通系统的导航与监测能力方面发挥着关键作用。Zang等[102]基于导航卫星系统，提出了危险品运输实时监测系统，该系统由定位、无线通信和信息处理三大模块组成，可实现对车辆位置的实时监测。

（2）卸载管理。星地融合网络对提升智能交通系统（ITS）的缓存和计算能力至关重要，其通过整合低轨卫星和高空平台，优化数据分发与处理流程。Yang等[103]依托星地融合技术，提出了一种全新的缓存与计算卸载方法，确保偏远地区的数据实时访问，为交通应用提供关键信息支持。具体而言，该团队设计了缓存策略，并提出多智能体联邦学习策略，有效降低了数据传输时延。

（3）分配管理。高效的资源与网络分配是优化智能交通系统性能的核心，认知卫星-车载网络为解决资源管理的复杂性问题、实现系统性能优化提供了可行框架。Ruan等[104]构建了认知卫星-车载网络，以提升智能交通系统的资源和网络分配效率，他们探究了能源效率与频谱效率的权衡关系，并为动态环境提出了统一的评估指标。Ruan等[105]还针对智能交通系统中的认知卫星-车载网络，开展了功率分配研究，其提出的能效-频谱效率权衡指标，能在干扰约束下实现资源分配的优化。

（4）拓扑管理。地面网络与卫星网络的融合，大幅提升了交通系统的通信能力，对物联网设备的通信优化尤为显著。Tello-Oquendo等[106]提出了一种垂直切换框架，基于业务需求选择最优接入技术，优化了星地融合网络的互联互通性与通信性能，实现了网络的无缝连接。

7.2. 金融领域

已有多项研究聚焦卫星通信系统在金融行业运营中的应用，卫星网络在长距离、大容量数据传输方面的性能优于地面网络，能为金融机构提供稳定可靠的网络连接，保障金融决策和风险管理所需关键数据的高效传输。此外，卫星通信支持安全交易和高效数据处理，确保金融信息的完整性和保密性。

Guskov [107]设计了一套融合地球静止轨道卫星和低轨卫星的信息卫星系统，该系统优化了通信信道，提升了金融机构的运营效率。Chen等[108]的研究表明，卫星数据与人工智能技术结合，能在农业灾害期间提升小农群体的金融普惠性。此外，Shaengchart和Kraiwanit [109]强调了卫星互联网的重要性，其能为新兴经济体拓展金融资源获取渠道，提供职业发展机遇。卫星网络通过连接通信薄弱群体，助力金融服务升级，推动经济增长。

7.3. 工业生产领域

近期研究揭示了空气污染与工业发展的紧密关联，凸显了实施有效监测与管理的必要性。Zhang等[110]探究了区域空气污染对产业结构升级的影响，研究发现，细颗粒物（$PM_{2.5}$）浓度每上升1%，产业结构高度化水平就会下降2%，进而对投资和创新活动产生不利影响。Fu等[111]利用卫星观测数据分析了中国的工业排放情况，发现高浓度二氧化氮区域主要集中在东部，而高浓度二氧化硫区域

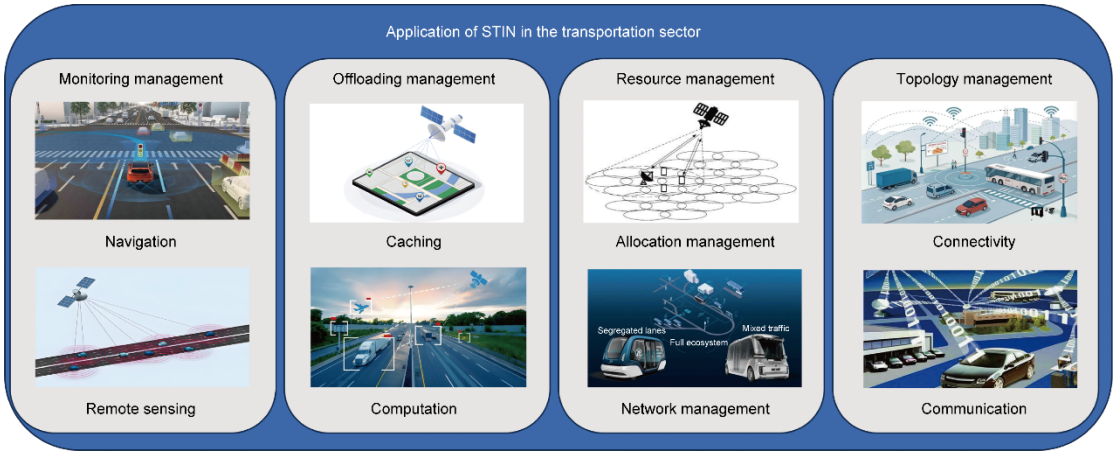

图5. 星地融合网络在交通领域的应用分类。

则分布在北部。此外，Rojano等[112]对哥伦比亚北部的可吸入颗粒物水溶性离子进行了评估，发现硫酸盐含量与卫星数据高度相关，这充分体现了卫星技术在排放监测中的应用价值。

7.4. 应急救援领域

星地融合网络能突破地面通信在覆盖盲区、信号干扰等方面的局限，成为应急救援领域不可或缺的技术手段。卫星通信与地面网络的融合，构建了稳定可靠的数据传输通道，即便地震、洪水、台风等自然灾害导致地面基础设施受损，该通道仍能保持畅通。

Zheng等[113]设计了基于高通量卫星的应急救援通信系统，利用高通量卫星实现灾区的高速通信，支持救援队伍与指挥中心间的快速数据交互，提升应急响应效率。同样，Zheng等[114]阐述了中国首个基于地球静止轨道的移动卫星通信系统——天通一号的应用优势，该系统能为偏远地区和受灾区域提供无间断的通信覆盖，在地面网络瘫痪时，可提供实时语音、数据和多媒体服务，提升大规模救援行动的指挥效率。为进一步提升卫星星座在应急场景中的应用能力，Liu等[115]设计了一套具备高重访能力的全天候遥感微卫星星座，该技术的进步提升了应急响应能力，实现了灾害的实时监测。此外，Liu等[116]研发了基于便携式卫星站的气象应急通信系统，融合无线通信与卫星通信技术，保障应急场景下的安全通信。上述研究均表明，星地融合网络显著提升了应急通信系统的性能，是灾害救援工作的重要支撑。

8. 实验研究和数据集

本节将首先介绍星地融合网络相关的框架、平台和仿真器，随后探讨仿真实验中使用的相关数据集。

8.1. 框架、平台和仿真器

在星地融合网络中，框架、平台和仿真器相互关联、协同作用，保障系统的效率和功能实现。其一，框架是统筹星地融合相关工作的高层抽象体系，帮助开发者在无需直接处理仿真问题的前提下进行应用设计；其二，平台为框架和应用提供核心资源与功能支撑，通常集成仿真器，用于对通信过程进行建模；其三，仿真器负责执行仿真任务，支持框架和应用调取仿真数据、开展系统响应测试。这些要素以通信网络为运行基础，共同构建了星地融合网络的高效运行环境。本文通过总结其常见应用分类，对框架、平台和仿真器进行归类（表7 [117–132]）。

（1）框架。星地融合网络框架涵盖资源管理、网络控制、数据共享等多个方面。

- DCOOL：Kim和Kwak [117]提出了面向低轨卫星辅助边缘计算的资源管理框架DCOOL，该框架聚焦低轨卫星移动边缘计算架构下的动态计算卸载与资源分配，基于李雅普诺夫优化算法，在维持队列稳定的同时，实现平均功耗和传播时延的最小化，提升了工作负载处理效率，有效降低了系统整体功耗。
- PTMB：Li等[118]基于预训练马尔可夫（PTMB）模型研发了PTMB框架，适用于多任务场景下的卫星在线任务调度，该框架包含任务决策和任务分配两个核心阶段，通过预训练马尔可夫模型，结合资源预分配和任务排序策略优化调度流程，相比传统调度方法，该框架提升了任务收益，大幅缩短了耗时。
- DLSDN：Wang等[119]提出了双层软件定义网络（DLSDN）框架，以优化低轨星座网络的控制能力，该框架集成了调度更新机制和触发响应机制，分别应对可预测的网络变化和突发的网络波动。仿真结果表明，DLSDN框架提升了网络可达性，将故障恢复时间缩短至数百毫秒。
- StarCross：Du等[120]为卫星物联网设计了轻量级的安全数据共享框架StarCross，该系统采用可编辑区块链技术，提升了系统的可扩展性和安全性；基于空天地共享架构，将低轨卫星作为不同数据段的中介节点。理论分析和实验结果均表明，与现有方法相比，StarCross框架显著提升了系统的可扩展性和安全性。

（2）平台。星地融合网络平台大致可分为卫星仿真平台和卫星集成应用软件平台两类。

- CAST2000：Qin等[121]研发了CAST2000小卫星平台，该平台可靠性高、灵活性强，已广泛应用于各类航天任务，支持遥感、通信等多种应用，注重设计的高效性和资源管理的优化，通过优化频率设计解决耦合问题，保障卫星的响应性能和在轨稳定运行。
- DFH-3E：Hou等[122]推出了DFH-3E卫星平台，这是一款采用全电推进的小型地球静止轨道卫星系统，专为中小通信容量需求设计，支持最多20个转发器，可根据用户需求选配霍尔电推进或离子电推进系统。
- MODIS：Pinna等[123]指出，2000—2022年间，中分

表7 相关框架、平台和仿真器

Type	Name	Ref.	Category	Description
Framework	DCOOL	[117]	Resource management	Dynamic computation offloading and resource allocation for LEO satellite-assisted (DCOOL) edge computing in a ground–space integrated framework
	PTMB	[118]	Resource management	An online satellite task-scheduling framework for multi-task scenarios leveraging a pre-trained Markov-based (PTMB) model
	DLSDN	[119]	Network control	A novel dual-layer SDN (DLSDN) in-band control framework
	StarCross	[120]	Data sharing	A secure data-sharing framework for satellite IoT using redactable blockchain
Platform	CAST2000	[121]	Satellite platform	A versatile small satellite platform for high-precision control and efficient management
	DFH-3E	[122]	Satellite platform	A small GEO all-electric propulsion satellite platform
	MODIS	[123]	Satellite platform	An Earth observation platform on the Terra and Aqua satellites for multi-spectral data including a moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS)
	GREAT	[124]	Software platform	The high-performance Global Navigation Satellite System Research, Application, and Teaching (GREAT) software platform
	Mini-Savi	[125]	Software platform	A simulation platform for large-scale satellite constellations, combining mininet and satellite constellation visualization (Mini-Savi)
	PINOCCHIO	[126]	Software platform	The Platform Integrating Navigation and Orbital Control Capabilities Hosting Intelligent Onboard (PINOCCHIO)
	SEACOP	[127]	Software platform	The SatEllite Application Capability Open Platform (SEACOP) based on Docker and Kubernetes
Simulator	DASE	[128]	Dynamics simulator	The Dynamic Attitude Simulator Environment (DASE) for real-data-based onboard flight code simulation
	LAPAN-ITB	[129]	Dynamics simulator	A micro-satellite simulator developed by the National Institute of Aeronautics and Space together with Institut Teknologi Bandung (LAPAN-ITB)
	GISTDA	[130]	Operations simulator	The Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (GISTDA) simulator for validating satellite operations in development tools
	TTC-RF	[131]	Functionality simulator	The telemetry, tracking, and command–radio frequency (TTC-RF) satellite simulator emulating the radio frequency function of a transponder
	SATSIM	[132]	Functionality simulator	The MATLAB/Simulink satellite simulator (SATSIM) for spacecraft hardware and environments

辨率成像光谱仪（MODIS）是应用最广泛的卫星平台，被大量用于草地和牧场的测绘与监测。尽管哨兵2号等新型平台的应用日益广泛，但凭借其长期的数据集优势，MODIS在遥感领域仍占据重要地位，融合机器学习算法的MODIS平台极大推动了生态系统监测研究的发展。

- GREAT：Li等[124]研发了全球导航卫星系统研究、应用与教学（GREAT）平台，该平台聚焦卫星大地测量和导航领域，核心功能包括空间大地测量数据处理、精密定位和轨道确定，集成多种技术实现大地测量参数的实时解算，能完成高精度的轨道和钟差确定，实现厘米级的定位精度。
- Mini-Savi：Tang等[125]提出了适用于巨型卫星星座的仿真平台Mini-Savi，通过星间链路降低传输时延，基于铱星星座的验证结果表明，该平台能精准实现卫星轨道建模和动力学仿真。
- PINOCCHIO：Sabatini等[126]研发了集成导航与轨道控制能力的星上智能平台（PINOCCHIO），该平台灵活性强，适用于卫星控制实验，其自由漂浮系统通过降低表面摩擦模拟微重力环境，实现类轨道动力学运动。此外，该研究还详细阐述了平台的导航、通信系统以及制导、导航与控制架构，为学术界和工业界的自由漂浮平台研发提供了重要参考。
- SEACOP：Wu等[127]推出了卫星应用能力开放平台（SEACOP），以优化卫星应用的部署和管理，该平台基于Docker和Kubernetes技术，为星地节点的卫星应用提供统一的运行环境，用户可通过网页端实时监测应用状态，支持基于数据、模板和镜像的多种应用部署方式。

（3）仿真器。星地融合网络的大规模部署存在复杂性

高、成本高的问题，难以获取海量的真实感知数据，而仿真器可生成合成数据，用于验证框架的可行性和性能，为实际部署提供参考依据。

- DASE：Yavuzyılmaz 等[128]研发了动态姿态仿真环境（DASE），用于测试航天器姿态控制飞行软件，该仿真器能模拟卫星的运动和行为特性，生成逼真的传感器信号，在卫星发射前完成控制器的验证。研究设计了两种运行场景：卫星发射后的姿态稳定控制和三轴指向天底控制。
- LAPAN-ITB：Triharjanto 等[129]基于 MATLAB 和 C 语言研发了 LAPAN-ITB 微卫星仿真器，支持卫星系统研发和操作人员培训，无需硬件即可完成设计验证，大幅降低研发成本。对姿态控制模块的测试结果表明，该仿真器能通过三个正交反作用轮精准模拟卫星姿态。
- GISTDA：Saroj 等[130]基于空中客车公司研发的卫星仿真工具 SimTG，搭建了泰国地理信息与空间技术发展局（GISTDA）卫星仿真器。SimTG 采用通用对象请求代理架构中间件进行数据分发，但其复杂性导致实时性能不佳。为解决该问题，研究团队提出采用消息队列遥测传输等轻量级中间件，以降低系统负载。
- TTC-RF：Gupta 等[131]基于专用平台和 Labview 软件，采用软件定义无线电技术，研发了遥测、跟踪与指令射频（TTC-RF）系统仿真器，能模拟遥测、跟踪与指令（TTC）应答机的所有射频功能，为卫星实际测试前的验证工作提供可配置的测试平台。
- SATSIM：Bodin 等[132]推出了实时多卫星仿真器 SATSIM，可在仿真环境中验证卫星的制导、导航系统和星上软件，能模拟传感器、执行器和航天器动力学特性，支持卫星的闭环测试。

星地融合网络相关的框架、平台和仿真器均以提升卫星运行效能为核心目标，各框架聚焦不同的优化方向（如资源管理），且多数已通过实际测试验证有效性。但各分类内部仍存在显著差异：例如，不同框架面向特定的应用领域，DCOOL 框架聚焦边缘计算，PTMB 框架则针对多任务调度；平台以不同方式支撑卫星运行，分为仿真平台和应用软件平台两类；仿真器则为框架和平台提供测试数据，在实际部署前验证其性能。

8.2. 数据集

目前已有基于星链、哨兵、世界观测等不同卫星平台研发的各类数据集，部分数据集[如气候感知卫星图像数据集（CASID）]聚焦环境监测，其余则侧重目标检测与跟踪。这些数据集为研究人员验证所提方法的有效性提供了重要支撑，相关信息总结见表 8 [133–139]。

- WetLinks 数据集[133]：该数据集为公开数据集，包含星链卫星网络的约 14 万条测量数据，由欧洲两个监测点历时 6 个月采集，涵盖上/下行吞吐量、往返时延、丢包率、路由追踪等核心网络参数，同时整合了周边气象站的气象数据。
- VehSat 数据集[134]：适用于卫星图像中的车辆检测，包含从 4 颗不同卫星、8 个区域采集的 4544 张卫星图像切片，对不同场景、不同分辨率下的 3.6 万余辆车辆进行了标注。
- SAT-MTB-SOS 数据集[135]：是卫星视频目标分割的基准数据集，包含 113 段视频序列、13 500 帧图像，覆盖飞机、火车、车辆、船舶、建筑五大目标类别，涵盖遮挡、运动模糊、非刚性形变等挑战场景，可用于评估分割算法的性能。
- iVision MRSSD 数据集[136]：包含 11 590 幅合成孔径雷达图像切片，每张图像的分辨率为 512 × 512 像素，标注了 27 885 个船舶目标，数据来源于 6 个卫星传感器，覆盖 C、L、X 三个雷达波段，按 7∶2∶1 的比例划分为训练集、验证集和测试集，可作为船舶检测算法的基准测试数据集。
- GAZADeepDav 数据集[137]：结合挤压神经网络用于战场损毁识别，包含行星实验室的卫星图像，其中，

表 8 相关数据集汇总

Name	Ref.	Category	Description
WetLinks	[133]	Communication and tracking	A large and publicly available track-based Starlink measurement dataset
VehSat	[134]	Object detection	A large-scale dataset for vehicle detection in satellite imagery
SAT-MTB-SOS	[135]	Object detection	A satellite video single object segmentation benchmark dataset
iVision MRSSD	[136]	Object detection	A multi-resolution satellite based synthetic aperture radar ship detection (MRSSD) dataset
GAZADeepDav	[137]	Environmental monitoring	A high-resolution geotagged satellite image dataset for deep learning-based damage assessment via vision
S1S2-Water	[138]	Environmental monitoring	A global dataset for semantic segmentation of water bodies using Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery
CASID	[139]	Environmental monitoring	A large-scale climate-aware satellite image dataset (CASID)

7264张切片标注为“无损毁”，6196张切片标注为“损毁”。挤压神经网络在该数据集上的识别准确率达98.95%，融入双向长短期记忆层后，准确率进一步提升至99.10%。

- S1S2-Water数据集[138]：包含65组全球采样的哨兵1号和哨兵2号卫星图像三联组，每组均匹配二值水体掩模，样本选取依据主要土地覆盖类型和水体分布情况确定，同时整合了元数据和哥白尼数字高程模型数据，适用于训练、验证和测试地表水体分割卷积神经网络。
- CASID数据集[139]：包含亚洲30个区域的980幅卫星图像，每张图像的分辨率为5000 × 5000像素，覆盖四个气候带，专为域自适应土地覆盖语义分割任务而设计。

卫星技术相关数据集相互关联，共同推动各领域研究发展，每个数据集均面向特定应用场景，如通信、目标检测、环境监测等。例如，WetLinks数据集为卫星通信性能研究提供数据支撑，VehSat、SAT-MTB-SOS、iVision MRSSD数据集聚焦目标检测领域，GAZADeepDav、S1S2-Water、CASID数据集则分别用于灾害损毁、水体、土地覆盖的环境监测研究。尽管各数据集的研究重点不同，但均以推动卫星相关研究和应用发展为共同目标。

9. 讨论与未来研究方向

本节将首先探讨星地融合网络对相关领域的影响，随后分析该领域的发展趋势和潜在研究方向，为星地融合网络的未来发展提供参考。

9.1. 星地融合网络的影响

本文第4~6节对解决星地融合网络挑战的三类核心技术进行了分类和总结，本节将探讨星地融合网络对这些技术的影响。这些技术均依托星地融合网络实现通信，但在带宽、时延和安全性的需求上存在差异。

（1）共性影响。星地融合网络为不同网络实体间的数据传输提供了核心基础设施，实现了信息的无缝交互，支撑卫星、无人机、地面站之间的协同工作，提升了任务执行和网络运行的效率。网络实体间的数据和信息共享，促进了相互间的协作与协调，进一步提升了系统整体性能。此外，星地融合网络的性能（尤其是数据传输速率和可靠性），是保障动态环境下系统实时响应的关键。

（2）差异性影响。星地融合网络对各类技术的具体影响因技术需求不同而存在差异：对于拓扑维护技术，星地融合网络保障了通信链路的稳定性，推动网络结构动态适配，这是网络实体移动过程中维持连接性的关键；对于网络路由技术，星地融合网络是跨层海量数据传输的核心支撑，其低时延、高带宽的特性是保障路由决策最优的前提；对于编排传输技术，星地融合网络负责协调各网络实体间的流量，核心要求是保障传输的可靠性，降低传输时延。

9.2. 与相关领域的交叉融合

多个领域与星地融合网络联系紧密，为现代通信系统中星地融合网络的发展提供了支撑，本节将对这些相关领域进行介绍。

（1）物联网。在星地融合网络中，物联网与低轨卫星深度融合，成为6G时代全球网络服务的核心支撑，这种融合拓展了物联网设备的应用场景，在基础设施薄弱的偏远地区尤为显著。随着物联网设备数量的激增，高效的数据传输需求日益迫切，星地融合网络为物联网设备提供了稳定可靠的连接，有效解决了偏远地区的通信难题[140]。依托低轨卫星，星地融合网络实现了物联网设备的实时数据交互，支持设备动态适配网络变化，这种融合提升了网络可靠性，推动了物联网解决方案在偏远地区的落地。

（2）人工智能。人工智能技术通过分析物联网设备和低轨卫星的采集数据，为星地融合网络提供了重要赋能，其算法能实现实时决策、优化资源分配、预测网络状态，从而提升流量管理效率和通信性能。尽管目前仍面临诸多挑战，但人工智能与星地融合网络的融合，显著提升了网络可靠性，为面向服务传输的智能应用的研发提供了支撑。

（3）云计算与边缘计算。低轨卫星与地面云计算、边缘计算系统的融合，优化了服务传输能力。云计算提供集中式数据处理能力，但对实时应用易产生时延；边缘计算将处理能力下沉至用户侧，有效降低时延。轨道边缘计算与地面资源的结合，解决了通信连接的难题，进一步提升了网络性能[141]。

（4）网络安全。星地融合网络中，数据在物联网设备与卫星间传输，网络安全至关重要。随着星地融合网络在各类关键应用中的应用日益广泛，亟须构建完善的安全防护体系，保障敏感数据安全和通信的连续性。星地融合网络采用多节点、多通信信道的独特架构，面临着严峻的网络攻击威胁，高效的网络安全策略能有效防范数据泄露、未授权访问、拒绝服务等攻击行为。通过集成先进的安全协议和加密技术，星地融合网络能保障数据的完整性和用户隐私，构建安全、抗毁的网络运行环境。

9.3. 未来研究方向

星地融合网络运行在动态环境中，传统通信技术需要消耗大量计算资源来估计通信信道，且无法应对频繁变化的网络拓扑。因此，人工智能驱动的解决方案（如RIS的人工智能辅助策略、联邦频谱学习、多任务学习）受到广泛关注，这类技术能提升系统在动态环境中的自适应能力[11–14]。此外，随着边缘计算和人工智能技术的发展，传统的通信和处理方法已无法满足自主系统实时数据处理的低时延需求。因此，可重构智能计算表面成为研究热点，其能提升边缘计算辅助网络的安全性和效率，在自动驾驶领域的应用潜力尤为显著[142–143]。这些技术发展表明，亟须开展进一步研究，突破传统方法的局限，探索新的研究方向，如提升网络协议的自适应能力、利用人工智能优化星地融合网络性能等。

10. 结论

本文对6G时代星地融合网络技术的最新研究进展和发展成果进行了系统综述。首先，介绍了星地融合网络的研究背景、概念及常见技术分类，重点阐述了该领域的核心研究模型——SAGIN其次，从卫星网络和地面网络两个视角，总结了现有研究中提及的问题；随后，从独特的网络层视角，对星地融合网络技术进行了全面综述和分类，将现有研究划分为拓扑维护、网络路由和编排传输三大方向，并根据架构复杂度，将每个方向进一步划分为单层卫星网络和多层卫星网络研究；此外，详细探讨了星地融合网络的主流应用场景及相关交叉领域；最后，总结了现有研究中使用的相关实验框架、平台和仿真器。

CRediT authorship contribution statement

Nuo Chen: Writing-original draft, Methodology, Investigation, Data curation, Conceptualization. **Yujie Song:** Writing-review & editing, Resources, Conceptualization. **Yue Cao:** Writing-review & editing, Supervision, Resources, Project administration, Conceptualization. **Zhili Sun:** Writing-review & editing, Resources. **Bo Zhao:** Resources. **Mi Wang:** Resources. **Debiao He:** Resources. **Guojun Peng:** Resources.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

感谢国家重点研发计划项目（2024YFB3108400）和湖北省重点研发计划项目（2024BAB051）对本研究的支持。

References

[1] Liu Y, Wang L, Lu Z, Du K, Shou G. A stateless design of satellite–terrestrial integrated core network and its deployment strategy. IEEE Trans Netw Serv Manag 2024;21(1):953–66.
[2] Jung DH, Im G, Ryu JG, Park S, Yu H, Choi J. Satellite clustering for non-terrestrial networks: concept, architectures, and applications. IEEE Veh Technol Mag 2023;18(3):29–37.
[3] Zhu X, Jiang C. Integrated satellite – terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges. IEEE Internet Things J 2022;9(1):437–61.
[4] David K, Berndt H. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G? IEEE Veh Technol Mag 2018;13(3):72–80.
[5] Yang P, Xiao Y, Xiao M, Li S. 6G wireless communications: vision and potential techniques. IEEE Netw 2019;33(4):70–5.
[6] Ray PP. A review on 6G for space–air–ground integrated network: key enablers, open challenges, and future direction. J King Saud Univ Comput Inf Sci 2022;34(9):6949–76.
[7] Won J, Kim DY, Park YI, Lee JW. A survey on UAV placement and trajectory optimization in communication networks: from the perspective of air-to-ground channel models. ICT Express 2023;9(3):385–97.
[8] Sharif S, Zeadally S, Ejaz W. Space–aerial–ground–sea integrated networks: resource optimization and challenges in 6G. J Netw Comput Appl 2023;215:103647.
[9] Tang F, Mao B, Kawamoto Y, Kato N. Survey on machine learning for intelligent end-to-end communication toward 6G: from network access, routing to traffic control and streaming adaption. IEEE Comm Surv Tutor 2021;23(3):1578–98.
[10] Cao X, Yang B, Wang K, Li X, Yu Z, Yuen C, et al. AI-empowered multiple access for 6G: a survey of spectrum sensing, protocol designs, and optimizations. Proc IEEE 2024;112(9):1264–302.
[11] Yang B, Cao X, Huang C, Guan YL, Yuen C, Di Renzo M, et al. Spectrum-learning-aided reconfigurable intelligent surfaces for “green” 6G networks. IEEE Netw 2021;35(6):20–6.
[12] Cao X, Yang B, Huang C, Yuen C, Di Renzo M, Han Z, et al. AI-assisted MAC for reconfigurable intelligent-surface-aided wireless networks: challenges and opportunities. IEEE Commun Mag 2021;59(6):21–7.
[13] Yang B, Cao X, Huang C, Yuen C, Di Renzo M, Guan YL, et al. Federated spectrum learning for reconfigurable intelligent surfaces-aided wireless edge networks. IEEE Trans Wirel Commun 2022;21(11):9610–26.
[14] Cao X, Yang B, Huang C, Yuen C, Renzo MD, Niyato D, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted aerial – terrestrial communications via multi-task learning. IEEE J Sel Areas Commun 2021;39(10):3035–50.
[15] Yang B, Cao X, Xiong K, Yuen C, Guan YL, Leng S, et al. Edge intelligence for autonomous driving in 6G wireless system: design challenges and solutions. IEEE Wirel Commun 2021;28(2):40–7.
[16] Liu J, Shi Y, Fadlullah ZM, Kato N. Space–air–ground integrated network: a survey. IEEE Commun Surv Tutor 2018;20(4):2714–41.
[17] Niu Z, Shen XS, Zhang Q, Tang Y. Space – air – ground integrated vehicular network for connected and automated vehicles: challenges and solutions. Intell Converg Netw 2020;1(2):142–69.
[18] Wang Z, Zhang F, Yu Q, Qin T. Blockchain-envisioned unmanned aerial vehicle communications in space – air – ground integrated network: a review. Intell Converg Netw 2021;2(4):277–94.
[19] Guo H, Li J, Liu J, Tian N, Kato N. A survey on space – air – ground – sea integrated network security in 6G. IEEE Commun Surv Tutor 2022;24(1):53–87.
[20] Liu Z, Wan L, Ma Y, Guo J, Guo S, Ma J, et al. Establishing trustworthy and

privacy-preserving SAGIVNs in 6G: architectures, requirements, and solutions. IEEE Netw 2024;38(2):141–7.
[21] Jain V, Reddy BVR, Payal A. Study of performance of hybrid satellite terrestrial cooperative communication system: a review. In: Proceedings of 2024 First International Conference on Electronics, Communication and Signal Processing; 2024 Aug 8–10; New Delhi, India. New York City: IEEE; 2024.
[22] Meng S, Wu S, Zhang J, Cheng J, Zhou H, Zhang Q. Semantics-empowered space – air – ground – sea integrated network: new paradigm, frameworks, and challenges. IEEE Commun Surv Tutor 2025;27(1):140–83.
[23] Patil A, Iyer S, López OLA, Pandya RJ, Pai K, Kalla A, et al. A comprehensive survey on spectrum sharing techniques for 5G/B5G intelligent wireless networks: opportunities, challenges and future research directions. Comput Netw 2024;253:110697.
[24] Ullah W, Yang F, Jayakody DNK. OTFS modulated massive MIMO with 5G NR LDPC coding: trends, challenges and future directions. Comput Netw 2024; 254:110751.
[25] Kumar R, Sinwar D, Singh V. QoS aware resource allocation for coexistence mechanisms between eMBB and URLLC: issues, challenges, and future directions in 5G. Comput Commun 2024;213:208–35.
[26] Mourtzis D, Giannoulakis S, Xirouchakis P. Smart manufacturing and tactile internet powered by 5G: investigation of current developments, challenges, and future trends. Procedia CIRP 2021;104:1960–9.
[27] Chawla D, Mehra PS. A roadmap from classical cryptography to post-quantum resistant cryptography for 5G-enabled IoT: challenges, opportunities and solutions. Internet Things 2023;24:100950.
[28] Ramezanpour K, Jagannath J. Intelligent zero trust architecture for 5G/6G networks: principles, challenges, and the role of machine learning in the context of O-RAN. Comput Netw 2022;217:109358.
[29] Afaq A, Haider N, Baig MZ, Khan KS, Imran M, Razzak I. Machine learning for 5G security: architecture, recent advances, and challenges. Ad Hoc Netw 2021;123:102667.
[30] Velasquez K, Perez Abreu D, Curado M, Monteiro E. Resource orchestration in 5G and beyond: challenges and opportunities. Comput Commun 2022; 192: 311–5.
[31] Guo W, Qureshi NMF, Siddiqui IF, Shin DR. Cooperative communication resource allocation strategies for 5G and beyond networks: a review of architecture, challenges and opportunities. J King Saud Univ Comput Inf Sci 2022;34(10):8054–78.
[32] Prerna D, Tekchandani R, Kumar N. Device-to-device content caching techniques in 5G: a taxonomy, solutions, and challenges. Comput Commun 2020;153:48–84.
[33] Mistry I, Tanwar S, Tyagi S, Kumar N. Blockchain for 5G-enabled IoT for industrial automation: a systematic review, solutions, and challenges. Mech Syst Signal Process 2020;135:106382.
[34] Israr A, Yang Q, Li W, Zomaya AY. Renewable energy powered sustainable 5G network infrastructure: opportunities, challenges and perspectives. J Netw Comput Appl 2021;175:102910.
[35] Srivastava A, Gupta MS, Kaur G. Energy efficient transmission trends towards future green cognitive radio networks (5G): progress, taxonomy and open challenges. J Netw Comput Appl 2020;168:102760.
[36] Condoluci M, Mahmoodi T. Softwarization and virtualization in 5G mobile networks: benefits, trends and challenges. Comput Netw 2018;146:65–84.
[37] Shayea I, El-Saleh AA, Ergen M, Saoud B, Hartani R, Turan D, et al. Integration of 5G, 6G and IoT with low Earth orbit (LEO) networks: opportunity, challenges and future trends. Results Eng 2024;23:102409.
[38] Li Y, Wang Y, Zhang Q, Yang Z. TCDS: a time-relevant graph based topology control in triple-layer satellite networks. IEEE Wirel Commun Lett 2020; 9(3): 424–8.
[39] Tedeschi P, Sciancalepore S, Di Pietro R. Satellite-based communications security: a survey of threats, solutions, and research challenges. Comput Netw 2022;216:109246.
[40] Zhang S, Zhu D, Liu Y. Artificial intelligence empowered physical layer security for 6G: state-of-the-art, challenges, and opportunities. Comput Netw 2024;242:110255.
[41] Javeed D, Saeed MS, Ahmad I, Adil M, Kumar P, Islam AKMN. Quantum-empowered federated learning and 6G wireless networks for IoT security: concept, challenges and future directions. Future Gener Comput Syst 2024;160: 577–97.
[42] Wang T, Gu Y, Wang H, Wu G. Adaptive variable neighborhood search algorithm with Metropolis rule and tabu list for satellite range scheduling problem. Comput Oper Res 2024;170:106757.
[43] Lin X, Chen Y, Xue J, Zhang B, He L, Chen Y. Large-volume LEO satellite imaging data networked transmission scheduling problem: model and algorithm. Expert Syst Appl 2024;249:123649.
[44] Wang T, Luo Q, Zhou L, Wu G. Space division and adaptive selection strategy based differential evolution algorithm for multi-objective satellite range scheduling problem. Swarm Evol Comput 2023;83:101396.
[45] Li H, Li Y, Meng QQ, Li X, Shao L, Zhao S. An onboard periodic rescheduling algorithm for satellite observation scheduling problem with common dynamic tasks. Adv Space Res 2024;73(10):5242–53.
[46] Ou J, Xing L, Yao F, Li M, Lv J, He Y, et al. Deep reinforcement learning method for satellite range scheduling problem. Swarm Evol Comput 2023; 77: 101233.
[47] Wei L, Chen M, Xing L, Wan Q, Song Y, Chen Y, et al. Knowledge-transfer based genetic programming algorithm for multi-objective dynamic agile earth observation satellite scheduling problem. Swarm Evol Comput 2024;85:101460.
[48] Liu J, Xing L, Wang L, Du Y, Yan J, Chen Y. A data-driven parallel adaptive large neighborhood search algorithm for a large-scale inter-satellite link scheduling problem. Swarm Evol Comput 2022;74:101124.
[49] Song Y, Xing L, Chen Y. Two-stage hybrid planning method for multi-satellite joint observation planning problem considering task splitting. Comput Ind Eng 2022;174:108795.
[50] Song Y, Wei L, Yang Q, Wu J, Xing L, Chen Y. RL-GA: a reinforcement learning-based genetic algorithm for electromagnetic detection satellite scheduling problem. Swarm Evol Comput 2023;77:101236.
[51] Ouyang M, Zhang R, Wang B, Liu J, Huang T, Liu L, et al. Network coding-based multipath transmission for LEO satellite networks with domain cluster. IEEE Internet Things J 2024;11(12):21659–73.
[52] Ma S, Hu X, Liao X, Wang W. Deep reinforcement learning for dynamic bandwidth allocation in multi-beam satellite systems. In: Proceedings of 2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems; 2021 Apr 23–26; Chengdu, China. New York City: IEEE; 2021.
[53] Li S, Wu Q, Wang R. Dynamic discrete topology design and routing for satellite –terrestrial integrated networks. IEEE/ACM Trans Netw 2024;32(5):3840–53.
[54] Xu R, Di X, Chen J, Wang H, Luo H, Qi H, et al. A hybrid caching strategy for information-centric satellite networks based on node classification and popular content awareness. Comput Commun 2023;197:186–98.
[55] Vergoossen T, Loarte S, Bedington R, Kuiper H, Ling A. Modelling of satellite constellations for trusted node QKD networks. Acta Astronaut 2020; 173: 164–71.
[56] Cong L, Ding H, Xie N, Wei X. Space delay-tolerant network routing algorithm based on node clustering and social attributes. Ad Hoc Netw 2024;155:103381.
[57] Wang K, Ma X, Kang H, Lyu Z, Feng B, Lin W, et al. An efficient topology partitioning algorithm for system-level parallel simulation of mega satellite constellation communication networks. Comput Netw 2024;238:110102.
[58] Korçak Ö, Alagöz F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in Earth-fixed LEO satellite systems. Comput Netw 2009;53(9):1497–511.
[59] Chen J, Di X, Xu R, Qi H, Cong L, Zhang K, et al. A remote sensing data transmission strategy based on the combination of satellite – ground link and GEO relay under dynamic topology. Future Gener Comput Syst 2023;145:337–53.
[60] Li H, Yu J, Cao L, Zhang Q, Song Z, Hou S. Multi-agent reinforcement learning based computation offloading and resource allocation for LEO satellite edge computing networks. Comput Commun 2024;222:268–76.
[61] Zhu X, Wang H, Yang Z, Pham QV. Time-division based integrated sensing, communication, and computing in integrated satellite – terrestrial networks. Digit Signal Process 2023;143:104262.
[62] He Y, Chen Y, Lu J, Chen C, Wu G. Scheduling multiple agile Earth observation satellites with an edge computing framework and a constructive heuristic algorithm. J Systems Archit 2019;95:55–66.
[63] Xu X, Gao Z, Liu A. Robustness of satellite constellation networks. Comput Commun 2023;210:130–7.
[64] Zhang S, Li X, Yeung KL. Segment routing for traffic engineering and effective recovery in low-Earth orbit satellite constellations. Digit Commun Netw 2024; 10(3):706–15.
[65] Changazi SA, Bakhshi AD, Yousaf M, Mohsin SM, Akber SMA, Abazeed M, et al. Optimization of network topology robustness in IoTs: a systematic review. Comput Netw 2024;250:110568.
[66] Tsai KC, Fan L, Lent R, Wang LC, Han Z. Distributionally robust optimal routing for integrated satellite – terrestrial networks under uncertainty. IEEE Trans Commun 2024;72(10):6401–15.
[67] He K, Zhou Q, Lian Z, Shen Y, Gao J, Shuai Z. Spatiotemporal precise routing strategy for multi-UAV-based power line inspection with integrated satellite – terrestrial network. IEEE Trans Ind Appl 2024;60(6):8418–29.
[68] Lyu Y, Hu H, Fan R, Liu Z, An J, Mao S. Dynamic routing for integrated satellite – terrestrial networks: a constrained multi-agent reinforcement learning approach. IEEE J Sel Areas Comm 2024;42(5):1204–18.
[69] Tian XD, Hu ZH. A branch-and-price method for a two-echelon location routing problem with recommended satellites. Comput Ind Eng 2023; 184:

109593.
[70] An H. The closed-open truck and loader routing problem for biomass transportation from satellite storage locations to a bioenergy plant. Comput Electron Agric 2022;194:106764.
[71] Crainic TG, Perboli G, Mancini S, Tadei R. Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis. Procedia Soc Behav Sci 2010;2(3):5944–55.
[72] Du P, Li J, Bai W, Sheng M, Zhou D. Dual location area based distributed location management for hybrid LEO/MEO mega satellite networks. IEEE Trans Vehicular Technol 2023;72(2):2307–21.
[73] Qi H, Guo Y, Hou D, Xing Z, Ren W, Cong L, et al. SDN-based dynamic multi-path routing strategy for satellite networks. Future Gener Comput Syst 2022; 133:254–65.
[74] Liu Q, Li X, Ji H, Zhang H. Multi-path routing algorithm with joint optimization of load-balancing for cluster-based LEO satellite networks. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content; 2023 Nov 3 – 5; Beijing, China. New York City: IEEE; 2023.
[75] Wang C, Ren Z, Cheng W, Zhang H. CDMR: effective computing-dependent multi-path routing strategies in satellite and terrestrial integrated networks. IEEE Trans Netw Sci Eng 2022;9(5):3715–30.
[76] Yang WC, Yao S. A multi-path routing algorithm based on ant colony optimization in satellite network. In: Proceedings of IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering; 2021 Mar 26–28; Nanchang, China. New York City: IEEE; 2021.
[77] Yan F, Wang Z, Zhang S, Meng Q, Luo H. Logic path identified hierarchical routing for large-scale LEO satellite networks. IEEE Trans Netw Sci Eng 2024; 11(4):3731–46.
[78] Yan F, Wang Z, Zhang S, Meng Q, Luo H. Load-aware hierarchical information-centric routing for large-scale LEO satellite networks. In: Proceedings of 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference; 2024 Apr 21–24; Dubai, United Arab Emirates. New York City: IEEE; 2024.
[79] Mao B, Zhou X, Liu J, Kato N. On an intelligent hierarchical routing strategy for ultra-dense free space optical low Earth orbit satellite networks. IEEE J Sel Areas Commun 2024;42(5):1219–30.
[80] Markovitz O, Segal M. Demand island routing for LEO satellite constellations. Comput Netw 2023;225:109655.
[81] Papapetrou E, Karapantazis S, Pavlidou FN. Distributed on-demand routing for LEO satellite systems. Comput Netw 2007;51(15):4356–76.
[82] Ji X, Liu L, Zhao P, Wang D. A-Star algorithm based on-demand routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite networks. In: Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Big Data; 2015 Oct 29–Nov 1; Santa Clara, CA, USA. New York City: IEEE; 2015.
[83] Yang L, Zhang H, Qi Y, Huang Q. Available energy routing algorithm considering QoS requirements for LEO satellite network. Comput Commun 2024;217:87–96.
[84] Macambira RDNM, Carvalho CB, de Rezende JF. Energy-efficient routing in LEO satellite networks for extending satellites lifetime. Comput Commun 2022; 195:463–75.
[85] Mesodiakaki A, Gatzianas M, Bratsoudis C, Kalfas G, Vagionas C, Maximidis R, et al. Online energy-efficient resource allocation in integrated terrestrial and satellite 6G networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications; 2024 Jun 9–13; Denver, CO, USA. New York City: IEEE; 2024.
[86] Qin X, Ma T, Tang Z, Zhang X, Zhou H, Zhao L. Service-aware resource orchestration in ultra-dense LEO satellite – terrestrial integrated 6G: a service function chain approach. IEEE Trans Wirel Commun 2023;22(9): 6003–17.
[87] Wang L, Chin KW. On emptying small satellite networks with in-network data aggregation. In: Proceedings of the 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference; 2018 Nov 21–23; Sydney, NSW, Australia. New York City: IEEE; 2018.
[88] Zhang Y, Wo T, Wang G, Ye T, Zhang J, Liu X, et al. Data acquisition and monitoring scheme for satellite network with time-varying topology. In: Proceedings of IEEE International Conference on Satellite Computing (Satellite); 2023 Nov 25–26; Shenzhen, China. New York City: IEEE; 2023.
[89] Parkes S, Ferrer A, Gonzalez A, Farras M, Gibson D, Winton B, et al. SpaceFibre payload data-handling network. In: Proceedings of the International SpaceWire & SpaceFibre Conference (ISC); 2022 Oct 17–19; Pisa, Italy. New York City: IEEE; 2022.
[90] Diao W, An J, Li T, Zhu C, Zhang Y, Wang X, et al. Low delay fragment forwarding in LEO satellite networks based on named data networking. Comput Commun 2023;211:216–28.
[91] Wiedmeier PD, Tyrer HW. A multiple segment transmission with majority decoding transport layer protocol for GEO–stationary Earth orbit satellites. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference Proceedings; 2004 Mar 6–13; Big Sky, MT, USA. New York City: IEEE; 2004.
[92] Huang X, Xia X. A satellite networking approach supporting batch ephemeris update. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting; 2024 Jun 19–21; Toronto, ON, Canada. New York City: IEEE; 2024.
[93] Feng Y, Sun Y, Peng M. Performance analysis in satellite communication with beam hopping using discrete-time queueing theory. IEEE Internet Things J 2024;11(7):11679–92.
[94] Barbero ÁI, Ytrehus Ø. Queuing aspects of packet coding based bidirectional communication over satellite channels. In: Proceedings of the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop; 2010 Sep 13 – 15; Cagliari, Italy. New York City: IEEE; 2010.
[95] Zhu Y, Sheng M, Li J, Liu R. Performance analysis of intermittent satellite links with time-limited queuing model. IEEE Commun Lett 2018;22(11):2282–5.
[96] Li T, Zhou H, Luo H, Quan W, Yu S. Modeling software defined satellite networks using queueing theory. In: Proceedings of IEEE Communications Conference; 2017 May 21–25; Paris, France. New York City: IEEE; 2017.
[97] Wen Z, Li L, Song J, Zhang S, Hu H. Scheduling single-satellite observation and transmission tasks by using hybrid actor-critic reinforcement learning. Adv Space Res 2023;71(9):3883–96.
[98] Chen X, Li X, Wang X, Luo Q, Wu G. Task scheduling method for data relay satellite network considering breakpoint transmission. IEEE Trans Veh Technol 2021;70(1):844–57.
[99] Li P, Li L, Zuo Y, Chen H, Liu W. Research on delay control parameters error and leading simulation method for GNSS satellites link emulator. In: Proceedings of IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering; 2019 Dec 9–11; Xi'an, China. New York City: IEEE; 2019.
[100] Teng SW, Chang JF. A robust wireless transmission control protocol to cope with channel errors in a long round-trip delay environment. In: Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications; 2003 Feb 23–Mar 1; Papeete, French Polynesia. New York City: IEEE; 2003.
[101] Friedrichs B, Wertz P. Error-control coding and packet processing for broadband relay satellite networks with optical and microwave links. In: Proceedings of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and the 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC); 2012 Sep 5–7; Vigo, Spain. New York City: IEEE; 2012.
[102] Zang M, Liu J, Pan Z. Real-time monitoring system for dangerous goods transportation based on Beidou navigation satellite system. In: Proceedings of IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference; 2014 Aug 8–10; Yantai, China. New York City: IEEE; 2014.
[103] Yang S, Xia X, Lorenzo B. Caching and computation offloading for intelligent transportation systems enabled by satellite–terrestrial networks. In: Proceedings of IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference; 2023 Oct 12 – 14; New York City, NY, USA. New York City: IEEE; 2023.
[104] Ruan Y, Zhang R, Li Y, Wang CX, Zhang H. Spectral – energy efficiency tradeoff in cognitive satellite – vehicular networks towards beyond 5G. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference; 2019 Apr 15–18; Marrakesh, Morocco. New York City: IEEE; 2019.
[105] Ruan Y, Li Y, Wang CX, Zhang R, Zhang H. Power allocation in cognitive satellite – vehicular networks from energy – spectral efficiency tradeoff perspective. IEEE Trans Cogn Commun Netw 2019;5(2):318–29.
[106] Tello-Oquendo L, Ahmed F, Lin CH, Lin SC, Lee M. Enabling LEO satellite vertical handover for massive 6G IoT random access. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications; 2024 Jun 9 – 13; Denver, CO, USA. New York City: IEEE; 2024.
[107] Guskov GY. Information satellite systems for the financial industry organizations. In: Proceedings of International Conference on Satellite Communications; 1994 Oct 18 – 21; Moscow, Russia. New York City: IEEE; 1994.
[108] Chen S, Lin H, Yang G. Efficient agricultural disaster financing using satellite data and artificial intelligence. Comput Electr Eng 2022;103:108394.
[109] Shaengchart Y, Kraiwanit T. Starlink satellite project impact on the internet provider service in emerging economies. Res Glob 2023;6:100132.
[110] Zhang F, Li Y, Li Y, Xu Y, Chen J. Nexus among air pollution, enterprise development and regional industrial structure upgrading: a China's country panel analysis based on satellite retrieved data. J Clean Prod 2022;335:130328.
[111] Fu Y, Sun W, Fan D, Zhang Z, Hao Y. An assessment of China's industrial emission characteristics using satellite observations of XCO_2, SO_2, and NO_2. Atmos Pollut Res 2022;13(8):101486.
[112] Rojano R, Arregocés HA, Restrepo G. Characterization of water-soluble ions in PM_{10} over an industrial area in northern Colombia: temporal variations and correlation with satellite data. Heliyon 2024;10(6):e28159.
[113] Zheng J, Wang X, Li Q. Design of emergency rescue satellite communication

system based on high-throughput satellite. In: Proceedings of IEEE 6th International Conference on Electronics and Communication Engineering; 2023 Dec 15–17; Xi'an, China. New York City: IEEE; 2023.
[114] Zheng J, Shan C, Li Q, Xu J, Wang X. Design of emergency rescue command platform based on satellite mobile communication system. In: Proceedings of IEEE 4th International Conference on Electronics and Communication Engineering; 2021 Dec 17–19; Xi'an, China. New York City: IEEE; 2021.
[115] Liu Y, Wan Z, Dai Y, Zhao Y, Liu Q, Ji C. Emergency constellation design based on micro SAR satellites. In: Proceedings of Global Reliability and Prognostics and Health Management; 2021 Oct 15 – 17; Nanjing, China. New York City: IEEE; 2021.
[116] Liu JJ, Hai SF, Wang ZR, Zhao Y, Shi X. Construction of meteorological emergency communication system based on portable satellite emergency communication station. In: Proceedings of the 12th International Conference of Information and Communication Technology; 2023 Apr 14 – 16; Wuhan, China. New York City: IEEE; 2023.
[117] Kim J, Kwak J. DCOOL: dynamic computation offloading and resource allocation for LEO satellite-assisted edge computing in a ground – space integrated framework. ICT Express 2024;10(6):1212–9.
[118] Li G, Li X, Li J, Chen J, Shen X. PTMB: an online satellite task scheduling framework based on pre-trained Markov decision process for multi-task scenario. Knowl-Based Syst 2024;284:111339.
[119] Wang N, Chen D, Liu L, Wang Y. A highly robust in-band control framework and protocol for LEO constellation networks. In: Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Communication Systems; 2024 Apr 19–22; Xi'an, China. New York City: IEEE; 2024.
[120] Du R, Chen T, Tian J, Shang T. StarCross: redactable blockchain-based secure and lightweight data sharing framework for satellite-based IoT. Comput Netw 2024;253:110718.
[121] Qin J, Xu X, Zhang H, Dong S. Frequency design and test verification of CAST2000 small satellite platform. In: Proceedings of International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science; 2023 Sep 22 – 24; Changchun, China. New York City: IEEE; 2023.
[122] Hou W, Wang J, Wang M, Liang X. Research and design of small GEO communication satellite based on all-electric propulsion platform. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Aerospace Engineering and Systems; 2023 May 19–21; Nanjing, China. New York City: IEEE; 2023.
[123] Pinna D, Pezzuolo A, Cogato A, Pornaro C, Macolino S, Marinello F. Applications of satellite platforms and machine learning for mapping and monitoring grasslands and pastures: a systematic and comprehensive review. Smart Agr Technol 2024;9:100571.
[124] Li X, Huang J, Li X, Yuan Y, Zhang K, Zheng H, et al. GREAT: a scientific software platform for satellite geodesy and multi-source fusion navigation. Adv Space Res 2024;74(4):1751–69.
[125] Tang Z, Zhao J, Li H, Guo T, Wang Q, Chen H, et al. Mini-Savi: realistic satellite network simulation platform based on open-source tools. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Frontiers of Computers and Communication Engineering; 2023 Jan 7 – 9; Xiamen, China. New York City: IEEE; 2023.
[126] Sabatini M, Gasbarri P, Palmerini GB. Design, realization and characterization of a free-floating platform for flexible satellite control experiments. Acta Astronaut 2023;210:576–88.
[127] Wu Y, Xu P, Huang Z. SEACOP: satellite application capability open platform. In: Proceedings of IEEE International Conference on Satellite Computing (Satellite); 2022 Nov 25–27; Shenzhen, China. New York City: IEEE; 2022.
[128] Yavuzyılmaz Ç, Akbas¸ M, Acar Y, Gulmammadov F, Kahraman Ö, Subaşı Y, et al. RASAT ADCS flight software testing with dynamic attitude simulator environment. In: Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies; 2011 Jun 9 – 11; Istanbal, Türkiye. New York City: IEEE; 2011.
[129] Triharjanto RH, Nur Ubay MS, Utama S, Poetro RE. Evaluation of attitude dynamic module on LAPAN-ITB micro-satellite simulator. In: Proceedings of IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology; 2015 Dec 3–5; Bali, Indonesia. New York City: IEEE; 2015.
[130] Saroj T, Sreesawet S, Channumsin S, Tandayya P. The performance issues and a new architecture design for the GISTDA satellite simulator. In: Proceedings of the 9th International Electrical Engineering Congress; 2021 Mar 10 – 12; Pattaya, Thailand. New York City: IEEE; 2021.
[131] Gupta S, Singh A, Raghavendra MR, Sagi VR. A software defined radio based satellite TTC-RF system simulator. In: Proceedings of IEEE Annual India Conference; 2016 Dec 16–18; Bangalore, India. New York City: IEEE; 2016.
[132] Bodin P, Nylund M, Battelino M. SATSIM—a real-time multi-satellite simulator for test and validation in formation flying projects. Acta Astronaut 2012;74:29–39.
[133] Laniewski D, Lanfer E, Meijerink B, van Rijswijk-Deij R, Aschenbruck N. WetLinks: a large-scale longitudinal starlink dataset with contiguous weather data. In: Proceedings of the 8th Network Traffic Measurement and Analysis Conference; 2024 May 21–24; Dresden, Germany. New York City: IEEE; 2024.
[134] Drouyer S. VehSat: a large-scale dataset for vehicle detection in satellite images. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 2020 Sep 26 – Oct 2; Waikoloa, HI, USA. NewYork City: IEEE; 2020.
[135] Kou L, Zhao M, Li S, Yang J. SAT-MTB-SOS: a benchmark dataset for satellite video single object segmentation. In: Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning; 2024 Apr 19 – 21; Zhuhai, China. New York City: IEEE; 2024.
[136] Humayun MF, Bhatti FA, Khurshid K. iVision MRSSD: a comprehensive multi-resolution SAR ship detection dataset for state of the art satellite-based maritime surveillance applications. Data Brief 2023;50:109505.
[137] Bouabid M, Farah M. GAZADeepDav: a high resolution geo-tagged satellite imagery dataset for analyzing war-induced damage. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 2024 Jul 7 – 12; Athens, Greece. New York City: IEEE; 2024.
[138] Wieland M, Fichtner F, Martinis S, Groth S, Krullikowski C, Plank S, et al. S1S2-Water: a global dataset for semantic segmentation of water bodies from Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 2024;17:1084–99.
[139] Liu S, Chen L, Zhang L, Hu J, Fu Y. A large-scale climate-aware satellite image dataset for domain adaptive land-cover semantic segmentation. ISPRS J Photogramm Remote Sens 2023;205:98–114.
[140] Sun J, Wang H, Sun J, Lv H, Liu J, Feng G. An online integrated satellite-terrestrial IoT task offloading and service deployment strategy. Internet Things 2024;26:101210.
[141] Lu H, Duan X, Chen Y. Integration of low Earth orbit satellites with terrestrial cloud–edge systems. In: Proceedings of the International Conference on Space–Air – Ground Computing; 2021 Oct 23 – 25; Huizhou, China. New York City: IEEE; 2021.
[142] Yang B, Zhang X, Yu Z, Cao X, Huang C, Alexandropoulos GC, et al. Reconfigurable intelligent computational surfaces for MEC-assisted autonomous driving networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference; 2024 Apr 21 – 24; Dubai, United Arab Emirates. New York City: IEEE; 2 024.
[143] Zhang X, Yang B, Yu Z, Cao X, Alexandropoulos GC, Zhang Y, et al. Reconfigurable intelligent computational surfaces for MEC-assisted autonomous driving networks: design optimization and analysis. IEEE Trans Intell Transp Syst 2025;26(1):1286–303.