doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250126.

无线光通信技术

周述淇,陈发堂. 卫星互联网的高效频谱共享研究综述[J]. 光通信研究, 2026(5):262-272.
Zhou S Q, Chen F T. A Survey on Efficient Spectrum Sharing in Satellite Internet[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):262-272.

卫星互联网的高效频谱共享研究综述

周述淇[1],陈发堂[2]
(1. 上海思朗科技股份有限公司,西安 710000; 2. 重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘要:卫星互联网的发展对频谱资源的高效利用提出了更高要求,传统固定分配方式难以满足动态环境需求。文章研究了非正交多址接入、认知无线电、区块链和人工智能在频谱共享中的应用,分析其适用性、优势及局限性,阐述了其在频谱共享中的应用原理,并综述当前研究进展,从适用场景、计算复杂度、频谱利用率、抗干扰能力以及误码率等维度进行对比分析。分析结果表面:非正交多址接入适用于高用户密度场景但受连续干扰消除算法限制,认知无线电依赖高精度感知技术,区块链提升频谱交易公平性但实时性较差,人工智能具备动态频谱资源预测但受限于数据质量。最后,结合多种技术的优势,提出若干建议,旨在为工程应用提供参考。

关键词:卫星互联网;频谱共享;非正交多址接入;认知无线电;人工智能
中图分类号:TN929.5 **文献标志码**:A

A Survey on Efficient Spectrum Sharing in Satellite Internet

ZHOU Shuqi[1], CHEN Fatang[2]
(1. ShangHai Smart Logic Technology LTD., Xi'an 710000, China; 2. Chongqing Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Despite the rapid expansion of satellite internet constellations for global coverage, static spectrum allocation cannot cope with the time-varying propagation and traffic dynamics of space-ground integrated networks. Here we systematically survey four dominant technical paradigms for spectrum sharing including Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), Cognitive Radio (CR), blockchain and Artificial Intelligence (AI). We elaborate their fundamental operating principles, map the full body of contemporary literature, and benchmark their trade-offs across five core quantitative dimensions including applicable deployment scenarios, computational overhead, spectrum utilization efficiency, interference resilience and bit-error performance. Our cross-technology comparison reveals distinct intrinsic limitations. The NOMA is well-suited for high-user-density scenarios but suffers performance degradation from Successive Interference Cancellation (SIC) residual noise. The CR performance relies on high-precision wideband spectrum sensing. The blockchain enables verifiable, equitable spectrum trading at the cost of substantial transaction latency. The data-driven AI facilitates predictive dynamic resource scheduling yet is constrained by the scarcity and quality of training datasets. By integrating the advantages of multiple technologies, we propose several recommendations aimed at providing a reference for future standardized engineering implementations.

Key words: satellite internet; spectrum sharing; NOMA; CR; AI

0 引 言

随着卫星互联网的部署不断加速,全球已形成多个大型卫星星座计划,如:GW 星座、千帆星座、Starlink 星座,力图打造全球覆盖的宽带网络。卫星互联网是非地面网络的重要组成部分,第三代移动伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)自第 17 版起被正式纳入移动通信标准体系,其具有覆盖范围广、不受地理限制等优势,在解决偏远地区、海洋、沙漠等场景的通信问题发挥着关键作用[1-4]。根据国际电信联盟的频谱分配架构,卫星通信核心频段主要有 L、S、C、Ku 和 Ka 等频段,上述频段也因"先占先得"国际规则与技术迭代升级形成了双重挤压,L/S/C 频段被卫星测控、气象业务及地面移动通信饱和占用,Ku/Ka 频段被静止地球轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星固定业务与低轨星座密集部署所占用[5]。而 3GPP 将 L、S 和 Ka 频段也纳入了标准,致使卫星互联网被迫在高度饱和的频段区内争夺有限资源[6-9]。频谱稀缺现已成为卫星互联网规模化落地的核心瓶颈,高效频谱共享技术是化解频段冲突的核心路径。

为应对卫星互联网频谱共享的多维度挑战,本

收稿日期:2025-03-30; 修回日期:2025-04-23; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:重庆市自然科学基金创新发展联合基金资助项目(CSTB2023NSCQ-LZX0114)
作者简介:周述淇(1991-),男,湖南娄底人。工程师,硕士,主要研究方向为 5G 移动通信、卫星通信。
通信作者:周述淇,工程师。E-mail: 234279535@qq.com
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

文选取四种技术进行系统梳理，即：非正交多址接入（Non-Orthogonal Multiple Access，NOMA）、认知无线电（Cognitive Radio，CR）、区块链以及人工智能（Artifical Intelligence，AI）。这些技术的协同逻辑可从纵向和横向两个维度解决频谱共享的全链路挑战，其中纵向维度包括频谱接入（NOMA 解决接入密度）、频谱感知（CR 感知空闲频谱）、频谱交易（区块链完成交易）、频谱决策（AI 优化决策）等功能维度；横向维度包括物理层（NOMA）、数据链路层（CR）、管理层（区块链）、决策层（AI）等层级维度。此外，从接入方式、安全机制与智能化三个核心需求出发，其中 NOMA 与 CR 分别代表高效复用与动态感知的两种共存式接入方式，适应卫星系统的高并发与频谱稀缺特点；区块链作为去中心化机制，有效保障多方频谱交易过程的安全；AI 则通过学习与预测提升频谱管理的智能化水平，应对复杂环境下的动态调度挑战。综上所述，NOMA、CR、区块链与 AI 的协同融合成为构建未来卫星频谱共享体系的技术基础。本文针对 NOMA 技术，重点探讨其在卫星通信融合、性能优化及物联网（Internet of Things，IoT）等方面的应用潜力；针对 CR 技术，综述其在频谱感知、空闲频谱利用和动态频谱管理中的研究进展；详细分析了区块链技术在分布式频谱管理中的应用，以及 AI 技术在智能化频谱管理中的作用。不仅对各类技术进行了独立分析，还从适用场景、计算复杂度、频谱利用率、抗干扰能力及误码率等多个维度进行了对比研究，以探讨不同技术的互补性和融合潜力。最后，结合当前技术趋势，提出了对卫星互联网频谱共享未来发展的建议，旨在为标准化研究和工程应用提供参考。

1 挑战与现状

相较于地面蜂窝网络，卫星互联网频谱共享存在频谱竞争、空间时变信道、静态分配机制失效三大核心挑战[10-14]。其一，频谱竞争加大频谱共享的复杂性，因为卫星互联网需要在有限的频谱资源下与其他卫星系统或地面网络共同工作，致使频谱竞争不可避免。而频谱竞争不仅来源于同轨道面的卫星星座间，还包括异轨道卫星星座和地面网络的协同干扰，多维度的频谱竞争会导致频谱重叠，从而加剧干扰和资源冲突；其二，动态环境对频谱共享提出了更高要求，卫星高速运动所带来的多普勒效应，会引起信号频偏，从而影响频谱分配的稳定性；其三，卫星的传播时延问题会使得传统的静态频谱分配方法难以实时应对复杂的业务需求，因为静态频谱分配往往是提前固定划分频谱资源，缺乏灵活调度机制，当面对突发流量增长或动态干扰时，易导致频谱资源浪费或通信质量下降；另外，星地链路、星间链路以及跨星座链路等多种通信方式共存，会加剧频谱管理的复杂度，使得频谱共享需要在时间、空间和频率等多维度进行动态调整。

目前，国内外业内学者针对 NOMA、CR、区块链以及 AI 等技术对频谱共享问题已提供多种解决方案。NOMA 方面，文献[15]提出一种减少频谱共享带来的拥塞及干扰的高效的 NOMA-CR 频谱共享机制。CR 方面，文献[16]研究了基于感知的频谱共享模型，并通过优化传输功率和感知时间，提高认知用户的吞吐量；区块链方面，文献[17]探讨了区块链技术在动态频谱共享中的应用，分析其在增强安全性和信任机制方面的优势。AI 方面，文献[18]利用马尔可夫模型和强化学习优化动态频谱接入，提高频谱利用率和系统性能。另外在过往的研究综述中，文献[19]探讨了基于数据库技术的卫星通信频谱共享方案；文献[20]研究了星地融合频谱共享的同频干扰问题；文献[21-22]总结了认知无线电网络的频谱共享流程、主流技术，对比了集中式与分布式、合作与非合作、动态频谱接入等频谱共享策略；文献[23]主要对频谱感知、频谱决策、频谱接入等功能进行了全面描述；文献[24]主要对空天地网络与地面网络的频谱共享进行研究，涵盖应用场景分析、共存模式分类及频谱感知与干扰管理等关键技术。然而，现有研究主要集中在频谱共享的某个单一研究维度，缺乏对 NOMA、CR、区块链和 AI 等技术在卫星互联网频谱共享中的系统性综述与对比分析。此外，标准化进程也在推进，频谱共享机制在 3GPP R17 中进行了基本明确，R18 进一步扩展非地面网络与地面网络共存策略。综上所述，如何在卫星互联网中实现高效频谱共享，仍是重要的研究方向，本文将在后续章节分别探讨 NOMA、CR、区块链以及 AI 技术在卫星互联网中频谱共享的应用与最新进展，为未来研究奠定理论基础。

2 关键技术

2.1 基于 NOMA 的频谱共享方案

2.1.1 技术模型与原理

NOMA 技术通过功率域复用实现频谱共享，该技术可将不同功率等级的用户信号叠加在同一段频段传输，并在接收端使用连续干扰消除（Successive

Interference Cancellation，SIC）技术将用户信号进行分离[25]。卫星场景下频谱共享模型如图 1 所示，假设用户 1 信道质量优于用户 2，信道质量差的用户所分配的功率会更多。在前向链路中，基站根据用户 1 和用户 2 所上报的信道状态信息进行差异化分配功率，将多用户信号通过叠加编码在相同频率传输，用户接收端利用 SIC 技术根据功率强度由高至低进行解码。由于用户 2 信道质量差，其信号优先被解码，并从叠加信号减去，剩余用户 1 的信号继续解码。

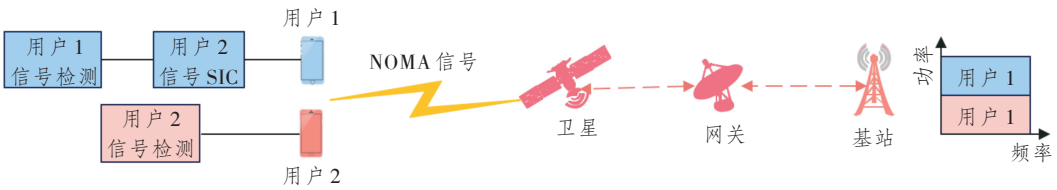


图 1　NOMA 频谱共享模型

Figure 1　NOMA-based spectrum sharing model

2.1.2　研究进展综述

现有研究已验证 NOMA 在卫星频谱共享中的增益，表 1 汇总了在卫星互联网方面研究。NOMA 与 CR 的融合为星地一体化网络的频谱共享提供了一种高效解决方案。文献[26]提出将 NOMA 和 CR 相结合的频谱共享方案，终端可同时访问空闲和繁忙频谱实现高效的全频谱接入。空闲时，采用非连续正交频分复用技术将空闲子载波进行聚合处理，在聚合后的空闲子载波上传输叠加信号；繁忙时，会造成相互干扰，先通过对卫星信号进行解码，地面信号为噪声，再通过 SIC 将解码后的卫星信号从接收的信号中抵消，剩余信号用于解码地面信号。文献[27]将 NOMA 与星地协作中继相融合，提出基于 NOMA 的协作频谱共享机制，卫星向地面 CR 中继广播信号时，对卫星用户应用解码转发中继协议以防止噪声放大，中继基于 NOMA 的功率曲线将卫星信号与地面信号进行叠加，通过功率域复用转发至地面网络用户，可提高频谱利用率以及解决卫星用户和地面网络用户之间的公平性。

表 1　NOMA 在卫星物联网频谱共享的研究

Table 1　Research on NOMA in Satellite Internet Spectrum Sharing

研究内容/目标	频谱共享侧重点	代表文献
终端同时访问空闲与繁忙频谱，实现全频谱接入	频谱接入	[26]
协作中继共享频谱，提升频谱利用率与公平性	协作频谱接入	[27]
提出 CR 与 NOMA 结合框架，提升频谱利用率	频谱效率分析	[28]
构建混合网络架构，评估多衰落信道下的频谱共享性能	频谱性能评估	[29]
提出 NOMA 频谱感知方案，提升频谱吞吐量	频谱感知	[30]
非理性条件下的频谱共享与用户公平性保障	频谱干扰管理、功率分配管理	[31]
NOMA 和拍卖机制结合，提高有效性和公平性	频谱分配	[32]
星地异构网络资源分配，减少跨层干扰	频谱分配与干扰管理	[33]

在频谱共享性能方面，中断概率（Outage Probability，OP）和遍历容量（Ergodic Capacity，EC）是衡量系统可靠性和频谱效率的关键指标，而闭式表达式推导尤为重要，因为它不仅精准刻画了频谱共享的性能，而且还为算法优化和资源分配提供了理论依据。此外，吞吐量、能量效率等因素同样在评估频谱共享方案的整体性能中占据重要地位。文献[28]研究了基于 NOMA 的卫星和地面中继网络，提出一种结合 CR 和 NOMA 技术的全新框架用于提高频谱利用率，该研究结合多 PU 下的干扰功率约束，推导出 OP 和 EC 的闭式表达式，并进一步获得了高信噪比下的 OP 渐进解。研究表明，减少 PU 数、调整功率分配因子和速率阈值可显著改善系统的通信性能。同时，文献[29]提出了基于 NOMA 的 CR 混合卫星地面频谱共享系统，通过卫星直连与次级地面网络中继服务的协同机制便于提供更高的频谱效率。推导 Shadowed-Rician、Nakagami-m 以及 Rician 下的 OP 闭式表达式用于评估次级地面网络的性能，并考虑 EC、能量效率和多用场景等系统性能指标以及探讨了功率分配因素、衰落严重程度、卫星链路参数等参数对系统性能的影响。研究表明，中断概率和吞吐量方面表现出更高的频谱效率。文献[30]针对频谱共享问题，提出一种基于 NOMA 的频谱感知方案，将其应用于卫星地面通信的前反

向链路场景，推导了 Shadowed-Rician 模型下特征检测的阈值闭式解以确保虚警概率控制在 0.1 量级，前反向链路检测性能与正交多址接入（Orthogonal Multiple Access，OMA）相当，但吞吐量比带频谱感知的 OMA 系统提升了 17.4% 以及不带频谱感知的 NOMA 系统提升 91%，反向链路也具有明显优势。在星地一体化网络中，非理想条件极大限制了频谱共享效率，如：信道状态不完美、干扰消除不完全等，文献[31]提出一种基于峰值干扰约束的 NOMA 星地一体化网络频谱共享技术，根据 Meijer-G 函数推导出非理想的主次用户覆盖概率的闭式表达式来衡量用户性能，并且提出一种动态自适应功率分配方案，推导主次用户的功率分配因子闭式解，以实现用户间的性能公平。

在混合卫星地面 IoT 方面，文献[32]提出一种 NOMA 技术和拍卖机制相结合的多信道频谱共享方案，其采用单次维克里–克拉克–格罗夫斯拍卖和顺序维克里拍卖机制，最大化卫星 IoT 用户的总传输速率，同时保障次级地面 IoT 网络的最低传输速率。研究结果验证了所采用的拍卖机制在频谱共享中的有效性与公平性，并证明了 NOMA 在次级中继选择上的优势。在星地异构网络中，资源分配和干扰管理是影响频谱共享效率的关键因素，文献[33]研究了一种上行 NOMA 星地异构网络资源分配机制，地面和卫星 UE 共享频谱进行通信，并构建地面用户速率与基站对卫星跨层干扰的效用函数，以最大化系统效用为目标，建立资源优化问题。由于该问题具有非凸性，则提出了三阶段方式进行求解，即：用户关联、宽带分配、功率分配，仿真验证了算法在提升效用、减少跨层干扰的有效性。

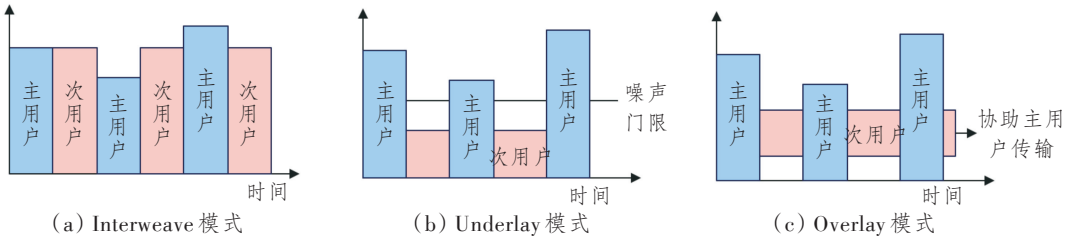
2.1.3 结论与分析

现有研究多采用 NOMA 与 CR、协作中继融合架构提升卫星频谱复用容量，以便提升频谱共享效率与用户接入能力。部分研究从闭式表达式角度深入评估中断概率、吞吐量等性能指标。总体而言，NOMA 技术在卫星互联网具有频谱复用优势，尤其在多用户、高密度接入场景下具有良好的系统容量提升能力。不过，该技术仍面临 SIC 解码复杂度高、干扰积累等问题，可结合信道状态感知与功率分配机制进行优化。

2.2 基于 CR 的频谱共享方案

2.2.1 技术模型与原理

CR 技术通过动态频谱感知与自主决策机制实现频谱共享，其核心在于实时监测授权频谱的使用状态并动态调整，充分利用空闲频谱提高频谱利用率。典型的认知无线电网络（Cognitive Radio Network，CRN）由主网络和一个或多个次网络组成，且存在两种用户类别，即：主用户（Primary User，PU）与次用户（Secondary User，SU），其中 PU 是授权频谱用户、SU 是非授权频谱用户。此外，虽然 SU 是非授权用户，但是其在不干扰 PU 的情况下可以接入空闲频谱资源。根据主次用户的共存方式可分为三种频谱共享模式[34]，即：Interweave、Underlay、Overlay，其模型如图 2 所示。在 Interweave 模式中（图 2(a)），SU 通过周期感知 PU 的频谱占用状态，仅在检测到空闲频段时 SU 才可接入，并在 PU 重新激活时立刻释放占用频段；在 Underlay 模式中（图 2(b)），SU 无需感知空闲频段，通过干扰温度模型约束 SU 的发射功率，使 PU 的累计干扰低于容忍阈值，SU 和 PU 就可同时传输；在 Overlay 模式中（图 2(c)），SU 协助 PU 进行数据传输，并可获得额外的带宽用于传输数据，即 SU 传输自身数据时同时协助 PU 传输数据。



（a）Interweave 模式　（b）Underlay 模式　（c）Overlay 模式

图 2　CR 频谱共享模型

Figure 2　CR-based spectrum sharing model

2.2.2 研究进展综述

CR 技术在频谱共享中的有效性已得到了研究者的验证，表 2 汇总了在卫星互联网方面研究。高效的频谱感知是实现动态频谱共享的关键环节，将卫星引入 CRN 以拓展感知范围和提升频谱利用率成为一种新型思路，文献[35]提出一种基于卫星多波束天线的频谱感知方法，用于地面 CRN 的动态频谱共享，其通过卫星在时间和地理纬度上感知频

谱状态，使主网络与 CRN 能够高效共存。与传统感知方法相比，所提方法采用线性变换与能量检测相结合的机制，使卫星多波束接收机能够同时感知多个小区的频谱适用情况，有效克服大规模覆盖场景的局限性。文献[36]基于 CR 面向星地融合卫星通信系统，提出一种基于时间或带宽协同的协作频谱感知算法，引入加权协作频谱感知机制，有效地抑制 SU 对 PU 所造成的干扰。此外，通过多地面站协同部分带宽执行全帧频谱感知，并卫星结合来自地面站的感知结果做出最终决策，以及求解出最大化次用户检测概率的最佳组合权重，可更有效地感知 PU 的存在。深度强化学习(Deep Reinforcement Learning，DRL)在频谱共享优化中展现出强大的自主决策能力，文献[37]针对非静止卫星轨道(Non Geostationary Satellite Orbit，NGSO)与 GEO 之间的频谱共享，提出一种基于 DRL 的认知卫星网络的动态频谱接入算法，通过奖励机制增强策略学习能力，使其在动态信道环境下快速收敛，并且 NGSO 用户通过频谱感知及传输功率调整动态地访问 GEO 的频谱。结果表明，与随机接入策略相比，所提算法在吞吐量提升方面有明显优势，吞吐量最优可提升 1.6 倍。

空闲频谱的共享可有效缓解卫星通信的频谱资源紧张问题，文献[38]分析卫星前向链路适用地面网络空闲频谱场景，针对认知卫星网络提出基于稳定匹配的频谱分配算法。该算法在 PU 和 SU 之间通过用户自主协商形成稳定匹配，并在保障 PU 通信优先级的前提下，提高了 SU 的频谱获取机会。而随着 SU 数量的增加，所提算法的吞吐量比贪心匹配提高 1.46 倍、随机匹配提高 2 倍，平均速率比随机匹配提高 50%，且频谱利用率始终优于随机匹配，最大可达 0.9。文献[39]提出一种结合 NOMA 和 CR 的频谱共享方案，可提升星地融合网络的频谱利用率，该方案利用 NOMA 实现用户间非正交接入，并通过 CR 技术在地面空闲频段动态接入，同时在占用频段内受限功率共享频谱资源，以减少干扰并提升系统吞吐量。

在频谱共享中，提高频谱利用率不仅依赖于高效的频谱分配策略，还需要智能动态管理机制。文献[40]基于动态合作的星地智能频谱分配方案，该方案的 PU 可共享频谱给认知用户 CU，并结合贪心算法和稳定匹配算法，优化频谱分配，提高系统吞吐量和频谱利用率。与传统分配方法相比，所提方案可将吞吐量提升至 125 Mbit/s，频谱利用率最高可达 0.9。另一方面，文献[41]提出基于软件定义频谱共享的认知卫星网络机制，利用动态频谱管理优化系统性能，并对不同信噪比和用户数量下的系统容量和服务模型进行了分析。对比传统多波束卫星系统，所提机制在信噪比为 25 dB 时的频谱利用率提高了 2.4 倍，用户数量为 10 时的频谱利用率提高了 3.5 倍。

表 2　CR 在卫星互联网频谱共享的研究

Table 2　Research on CR in Satellite Internet Spectrum Sharing

研究内容/目标	频谱共享侧重点	代表文献
多波束进行频谱感知，主网络与 CRN 高效共存	频谱感知	[35]
时间或带宽协作频谱感知，抑制 SU 对 PU 造成的干扰	协作频谱感知	[36]
DRL 提升认知接入效率，优化动态环境中 NGSO 用户接入 GEO 频谱	动态频谱接入	[37]
提出稳定匹配分配算法，提高 SU 频谱获取机会	频谱分配	[38]
NOMA 与 CR 结合实现高效动态接入与共享	动态频谱接入	[39]
引入智能分配策略提升频谱利用率	智能频谱分配	[40]
基于软件定义实现资源动态管理	频谱管理	[41]

2.2.3　结论与分析

由上述可知，CR 技术通过频谱感知与动态访问机制，为卫星通信中的空闲频段利用提供有效解决方案，特别在地面网络空闲频谱辅助星地频谱共享方面已取得初步进展。但是在高动态轨道环境下的感知延迟与误判仍是制约因素，且干扰控制精度不足的情况下可能会影响 PU 的通信质量。整体而言，CR 与调度机制、干扰管理等协同融合，可实现更高效的频谱动态利用。

2.3　基于区块链和 AI 的频谱共享方案

2.3.1　技术模型与原理

区块链技术的去中心化、可追溯和防篡改等特性为构建频谱共享平台提供了可信机制，其频谱共享模型如图 3 所示[42]。PU 和 SU 分别上报自身的频谱资源信息，汇聚成统一的频谱池，其中 PU 发布可用频谱资源，SU 提交租用需求，在区块链进行频

谱竞价。通过部署在区块链上的智能合约对频谱交易流程进行自动执行，包含频谱信息登记、租赁策略判定、价格计算及资源分配等，并且智能合约一旦部署就不可被篡改，保证各方在公平、透明的规则下完成交易。而所有交易数据、频谱信息、竞价请求与响应等都通过区块链层的分布书数据库节点完成记录与广播，并输出交易结果，即：频谱资源的分配与租赁信息，该结果在区块链中永久保存，为后续频谱行为追溯提供依据。

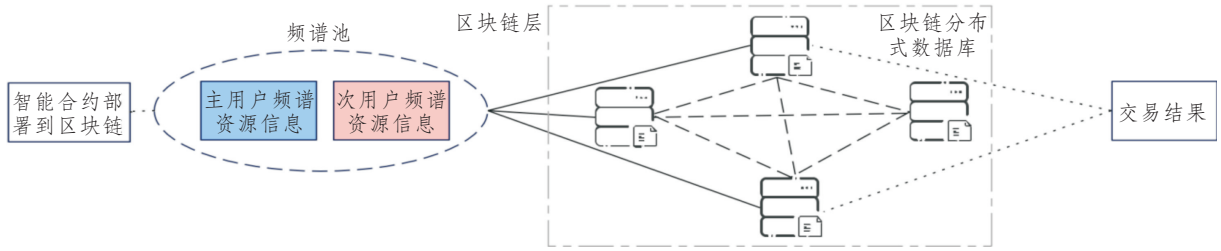


图 3 区块链频谱共享模型

Figure 3 Blockchain-based spectrum sharing model

基于数据驱动建模、动态优化决策与强化学习机制，AI 技术通过环境感知、智能体、反馈回路等流程，实现频谱资源的动态分配，其流程如图 4 所示。智能体利用强化学习算法以及环境状态信息进行制定频谱分配决策，并根据频谱使用反馈和系统奖励不断更新策略，从而实现自适应频谱分配。

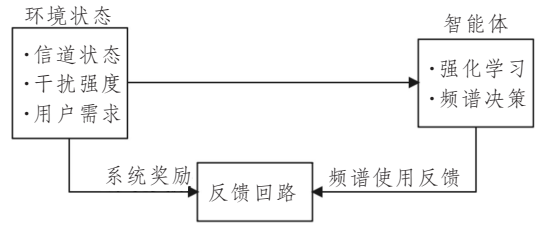


图 4 AI 频谱共享流程

Figure 4 AI-based spectrum sharing process

2.3.2 研究进展综述

固定频谱接入策略会导致大量频谱未被充分利用，动态频谱共享被视为实现频谱共享的有效手段，而区块链技术因去中心化特性为动态频谱共享提供了新的思路，表 3 汇总了卫星互联网频谱共享方面研究。文献[43]提出一种基于区块链的认知卫星网络频谱共享方法，其引入“频谱币”做为频谱租赁的交易媒介，并通过区块链协议执行频谱租赁、交易和分配流程。主卫星检测到空闲频谱后并发布租赁信息，次卫星提交频谱请求进行竞价，主卫星则根据报价高低分配频谱资源，且通过“频谱币”完成交易，该机制既能实现频谱资源最大化利用，也能解决频谱动态接入的安全性问题。另外，文献[44]提出一种基于区块链技术的分区式自主定制化动态频谱共享方法，用于卫星与地面网络之间的频谱共享。该方法采用分配和分层架构，各区域可自主管理频谱资源，且共同维护一个区块链账本。同时，引入频谱共识集成机制，将频谱共享流程与区块链共识协议相结合，使各区域并行频谱交易和动态调整分配策略，结果表明了该方法在低开销、高效率及稳健性方面的优势。在卫星物联网场景下，文献[45]提出一种基于区块链的安全频谱优化方案，其采用市场导向的差异化动态定价策略，以满足不同频谱用户之间的频谱需求，且通过区块链技术保障频谱交易的透明性与安全性，防止恶意用户参与频谱共享。

AI 在无线通信中的应用正逐步深入，凭借其强大的数据学习与预测能力，为星地一体化、海洋通信等异构网络的频谱共享提供了新的解决方案，表 3 总结了其在卫星互联网频谱共享方面研究。文献[46]针对星地频谱共享中的同频干扰与资源碎片化问题，提出一种基于智能频谱资源管理的频谱共享方案，其融合了支持向量机（Support Vector Machine，SVM）与卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）。该方案构建了分层感知、预测与决策框架，通过 SVM 优化频谱占用检测精度，以及利用卷积神经网络基于历史感知数据进行频谱预测，提前感知未来频谱状态，并且依据用户优先级和业务需求动态调整频谱分配策略，实现自适应频谱共享。仿真表明，相较于静态频谱共享方案，所提方案在用户密度变化情况下具备更高的频谱利用率，最高可提升约 3.5 倍。文献[47]针对卫星与海上移动网络的频谱共享问题，提出一种基于部分可观马尔可夫决策过程的智能频谱共享策略。同时，设计了结合竞争式深度 Q 网络与双深度 Q 网络的共享信道分配算法，以解决卫星无法完全观测共享信道状态的问题。结果表明，与传统时分多址或频分多址方法相比，所提算法在系统吞吐量方面具有显著提升，最优可提升 3 倍，并且可在动态环境下快速收

致，稳定优化频谱利用率。文献[48]针对GEO和低地球轨道(Low Earth Orbit，LEO)共存的干扰问题，提出一种事件驱动的深度强化学习的频段分配机制。该机制在GEO卫星中引入频谱管理单元，实时监测LEO的频谱使用情况，可智能分配频谱资源，并且利用近端策略优化方法处理LEO的随机频谱请求，实现网络性能的长期优化。结果表明，不同需求速率的平均速率下与贪心算法相比，所提机制在LEO场景下平均提升27.5%、在GEO卫星场景下平均提升27.2%；而与随机算法相比，所提机制在LEO和GEO场景分别提升95.7%和92.1%。

表3　区块链与AI在卫星互联网频谱共享的研究

Table 3　Research on blockchain and AI in Satellite Internet Spectrum Sharing

研究内容/目标	频谱共享侧重点	代表文献	技术类型
引入“频谱币”机制与区块链协议，可频谱资源最大利用化	频谱交易	[43]	
提出分区式自主定制化架构，可动态调制频谱分配	频谱交易	[44]	区块链
构建差异化动态定价机制，提升频谱交易透明性与安全性	频谱交易	[45]	
结合SVM与CNN，实现频谱感知、预测与分配的智能决策频谱共享	智能频谱管理	[46]	
采用双DQN实现海上场景中频谱共享资源的优化分配	智能频谱分配	[47]	AI
构建事件驱动的DRL频段分配机制，优化GEO与LEO之间的干扰	智能频谱分配	[48]	

2.3.3　结论与分析

从研究现状来看，区块链技术在保障频谱交易的可信性、去中心化管理以及可追溯性等方面展现出独特优势。但是，高时延共识机制在动态响应中的局限性不容忽视，则对实时性要求较高的场景适用性仍需优化。另外，尤其是深度学习与强化学习等AI技术，适用于动态变化环境的预测调度与感知决策场景。但是，也存在对数据质量和模型推理时间敏感等问题，后续可重点探索轻量级模型设计、多技术协同融合。

2.4　技术对比与分析

NOMA、CR、区块链以及AI等频谱共享技术的多元化发展为卫星互联网频谱共享提供了丰富的路径，它们分别在不同场景下展现出独特的优势，同时也存在各自的局限性。为了深入探讨这些技术的适用性，本节分别从适用场景、局限性、计算复杂度、频谱利用率、抗干扰能力等多维度进行对比分析，其如表4所示。

表4　频谱共享技术对比

Table 4　Comparison of spectrum sharing technologies

技术维度	NOMA	CR	区块链	AI
适用场景	高用户密度场景	动态频谱共享场景	频谱交易和租赁场景	高动态复杂环境
局限性	信道状态均匀时性能下降，多普勒频移导致SIC解码误差	频谱高度拥塞、无可用空闲频谱性能下降，高动态卫星网络场景感知延迟	延迟高导致不适用高实时性要求的场景，无法抑制物理层干扰	历史数据不足时预测效果差，轻量化不足导致时延高
计算复杂度	较高，需要在接收端实现SIC解码算法	适中，需高精度频谱感知算法	较高，需分布式账本存储、共识算法计算、交易验证	极高，需大规模数据进行训练
频谱利用率	功率域复用允许多个用户共享同一频段	动态接入空闲频谱提高频谱复用率	频谱交易提高资源分配的公平性，去中心化机制减少分配冲突	智能预测与动态分配，优化频段使用效率
抗干扰能力	抑制同频干扰，但高密度场景残余干扰显著	规避PU干扰，但对高动态环境适应性较差	无法应对信号干扰	动态干扰预测与规避能力强
误码率	$10^{-2}\sim10^{-4}$[49]	$10^{-4}\sim10^{-5}$[50]	不直接影响传输	$>=10^{-5}$

根据表4可得知，本文所提到的频谱共享技术之间存在显著的差异，下面对各维度对比结果进行更深入的分析：

①适用场景和局限性方面，NOMA通过不同功率等级为多个用户分配相同频谱资源，使其在高用户密度场景下提高系统吞吐量。但NOMA的性能高度依赖用户间的信道差异，如信道条件高度相似、用户分布均匀，则SIC难以有效区分用户信号，从

而导致性能下降，即 NOMA 不适用于用户均分分布场景；CR 通过频谱感知动态接入空闲频段，其依赖于可用的空闲频谱资源，如果所有资源都被占用，CR 就无法找到可利用的频谱，且高动态卫星网络会导致频谱感知不稳定，从而影响可靠性；区块链适用于卫星间频谱租赁及多运营商频谱交易，其交易确认机制通常涉及共识计算，会导致较高的时延，导致难以满足低时延要求场景；AI 通过大规模数据训练预测频谱需求，适用于高动态复杂环境，如果历史数据有限，如：新部署的卫星系统或低频次适用的轨道，AI 模型则难以有效学习，会影响预测的准确性。

②计算复杂度方面，表现最优的技术是 CR、最弱技术是 AI，其中 NOMA 需要接收端实施 SIC 解码以便分离多个功率层叠加的信号，该过程涉及复杂的信号处理运算，计算复杂度较高。随着用户数量增加，计算量呈指数级增长，则对于低功耗卫星终端而言，其计算负担可能较重；CR 需要高精度频谱感知算法，如：匹配滤波，这些算法的计算复杂度虽然低于 NOMA，但在高动态环境下需要更频繁的频谱感知，增加计算开销；区块链的计算复杂度来源于分布式账本的存储、共识算法计算和交易验证，其中工作量证明等传统共识机制计算开销巨大，而权益证明和拜占庭容错共识尽管降低了计算开销，但仍对低时延场景不友好；AI 需要处理大规模数据进行训练，尽管推理阶段的计算量相对较低，但如果需要在线更新模型或基于新环境动态学习，计算需求将大幅上升。

③频谱利用率方面，NOMA 和 AI 均表现突出、区块链技术表现较弱，其中 NOMA 通过功率复用技术允许多个用户共享相同频谱，从而提升频谱利用率，但频谱效率受限于功率分配策略和 SIC 解码能力，尤其在高密度用户场景下，残余干扰可能影响系统性能；CR 通过动态接入空闲频谱提高频谱效率，但其效果依赖于感知精度，如果误判将导致 PU 干扰或误检测空闲频谱，导致性能下降；区块链通过去中心化的方式管理频谱交易，减少分配冲突，提高资源公平性，其本身并无法提升频谱利用率，但其透明性和可追溯性有助于优化资源分配策略，间接提升整体频谱利用率；AI 通过智能预测和动态分配优化频谱使用，但其效率取决于训练数据和模型质量，如果预测不准确，可能导致资源浪费或冲突。

④抗干扰能力方面，表现最突出的技术是 AI、最差技术是区块链，其中 NOMA 主要应对同频干扰，通过功率域复用和 SIC 技术减少干扰，但是在高密度用户环境中，SIC 解码误差可能积累导致残余干扰增加；CR 通过动态频谱感知规避 PU 干扰，但在高动态环境下，PU 的突发占用可能导致终端频繁切换频段，影响通信连续性；区块链通过不可篡改账本和智能合约拦截非法接入，其主要作用在于身份验证和授权，而无法直接抑制物理层干扰，如：同频干扰或窄带干扰；AI 依赖数据驱动的方式优化干扰预测与规避能力，但是对于突发干扰或新型干扰形式，AI 模型可能缺乏足够的适应性。

⑤在误码率方面，表现最佳的技术是 NOMA、最差技术是 AI，其中 NOMA 误码率最优情况可为 10^{-3}，不过依赖于 SIC 性能；CR 误码率最优为 10^{-4}，受限于感知影响；区块链属于频谱交易，不直接影响物理传输；AI 误码率在高质量模型的提前下，最优可达到 10^{-5}。

综上所述，NOMA 适用于高用户密度的场景，能够提升频谱复用效率，但计算复杂度较高；CR 适用于动态频谱共享，但在高动态环境下面临挑战；区块链适用于频谱交易，但实时性较差；AI 能够优化频谱管理，但依赖于高质量数据。然而，在卫星互联网的弱链接、高动态、高密度等典型场景，技术协同成为了一种趋势，其中弱链接场景信道质量波动大，适用于 AI 与 CR 的组合，AI 可预测信道变化趋势复制频谱感知，CR 则进行实时动态接入，避开质量较差频段；高动态场景的频谱状态变化迅速，AI、CR 以及区块链三者的组合更适宜，AI 预测未来空闲频段弥补 CR 感知滞后，轻量级区块链用于快速协商频谱资源权属，降低冲突概率；高密度场景下多用户并发需求高，AI 与 NOMA 组合可提升系统总吞吐量，AI 优化功率分配策略与用户调度，NOMA 则支持多用户共用频段。

3 结束语

本文对卫星互联网频谱共享的关键技术进行了系统性分析，阐述了 NOMA、CR、区块链以及 AI 技术应用频谱共享中的原理，重点探讨了它们在卫星互联网频谱共享中的研究，从适用场景与局限性、计算复杂度、频谱利用率、抗干扰能力以及误码率等多维度进行了对比分析。最后，在总结各类技术优势与局限的基础上，提出针对卫星互联网频谱共享的若干建议。在未来，应进一步探索多技术融合方案，结合 NOMA 的频谱复用能力、CR 的动态感知能力、区块链的可信管理能力及 AI 的智能优化能力，构建高效、智能的频谱共享体系，以满足卫星互联网

对频谱资源日益增长的需求。

针对未来卫星互联网频谱共享技术的发展趋势，本文提出如下建议，以促进技术演进，其包括：①NOMA、CR、区块链和AI各有优势，但单一技术很难满足卫星通信频谱共享的复杂需求，可探索多技术融合，克服单一技术局限性，其中CR可利用AI优化频谱感知，提高CR在低信噪比环境下的检测准确性，减少误检和漏检，进一步提升频谱利用率；NOMA利用边缘计算减少信号处理延迟，优化功率控制策略，增强系统鲁棒性；区块链可采用AI进行智能决策，提高频谱交易的效率。②干扰管理仍是频谱共享的一大挑战，可结合DRL改进CR技术中的干扰抑制，通过DRL动态调整感知阈值，提高不同环境下的频谱检测准确性；基于AI优化NOMA功率分配策略，AI可进行智能功率分配，提高不同用户间的功率控制精度，降低干扰。另外，结合AI与强化学习，在卫星通信频谱共享过程中实时预测潜在干扰，并动态调整频谱资源分配策略。

参考文献：

[1] 周述淇，陈发堂. 5G非地面网络技术进展研究[J]. 电子技术应用，2025，51(3)：6–11.
Zhou S Q，Chen F T. Research on the Process of Non-Terrestrial Networks for 5G[J]. Application of Electronic Technique，2025，51(3)：6–11.

[2] 周述淇，陈发堂. 5G非地面网络技术标准化研究[EB/OL]. (2025-03-07)[2025-03-30]. https://link. cnki. net/urlid/42. 1266. TN. 20250307. 0959. 005.
Zhou S Q，Chen F T. Research On 5G Non-Terrestrial Network Technology Standardization [EB/OL]. (2025-03-07)[2025-03-30]. https://link. cnki. net/urlid/42. 1266. TN. 20250307. 0959. 005.

[3] 孙耀华，彭木根，赵亚飞，等. 低轨卫星互联网：从星地融合迈向通导遥一体化[J]. 北京邮电大学学报，2024，47(6)：69–98.
Sun Y H，Peng M G，Zhao Y F，et al. Low Earth Orbit Satellite Network：From Satellite-Terrestrial Convergence to the Integration of Communication，Navigation and Sensing[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications，2024，47(6)：69–98.

[4] 高璎园，王妮炜，陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想[J]. 中国电子科学研究院学报，2019，14(8)：875–881.
Gao Y Y，Wang N W，Lu Z. The Development Research and Construction Suggestion of Satellite Internet Constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology，2019，14(8)：875–881.

[5] 付降寅，郭庆. 面向星地一体化网络的频谱共享方法研究[J]. 移动通信，2024，48(9)：64–70.
Fu X Y，Guo Q. Spectrum Sharing Methods for Satellite-Terrestrial Integrated Networks[J]. Mobile Communications，2024，48(9)：64–70.

[6] 3GPP TS38.811. 3rd Generation Partnership Project；Technical Specification Group Radio Access Network；Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial net-works (Release 16)[S]. France：3GPP OrganizationalPartners，2020.

[7] 3GPP TS38.863. 3rd Generation Partnership Project；Technical Specification Group Radio Access Network；Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)：Non-terrestrial networks (NTN) related RF andco-existence aspects (Release 17)[S]. France：3GPP Or-ganizational Partners，2023.

[8] 3GPP TS38.741. 3rd Generation Partnership Project；Technical Specification Group Radio Access Network；Non-Terrestrial Networks (NTN) L-/S-band for NR (Re-lease 18)[S]. France：3GPP Organizational Partners，2024.

[9] 3GPP TS21.918. 3rd Generation Partnership Project；Technical Specification Group Radio Access Network；Technical Specification Group Services and System Aspects；Release 18 Description；Summary of Rel-18 WorkItems (Release 18)[S]. France：3GPP Organizational Part-ners，2024.

[10] 张更新，王运峰，丁晓进，等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报，2021，42(8)：1–14.
Zhang G X，Wang Y F，Ding X J，et al. Research on Several Key Technologies of Satellite Internet[J]. Journal on Communications，2021，42(8)：1–14.

[11] 张泓湜，蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报，2018，44(9)：1909–1917.
Zhang H S，Jiang B F. Spatial Isolation Methodology for Spectral Coexistence in LEO Satellite Systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2018，44(9)：1909–1917.

[12] Clancy C，Ramaswamy V，Scher D，et al. Distributed Spectrum Sharing Systems：Promises and Challenges [C]//2024 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). Washington，DC，USA：IEEE，2024：10632830.

[13] Bhattarai S，Park J J，Gao B，et al. An Overview of Dynamic Spectrum Sharing：Ongoing Initiatives，Chal-

lenges, and a Roadmap for Future Research[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2016, 2(2): 110–128.

[14] Brown C, Ghasemi A. Evolution Toward Data-Driven Spectrum Sharing: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Access, 2023, 11: 99680–99692.

[15] 胡柳静,胡向晖,刘智鑫,等.基于NOMA-CR的下一代接入网中的频谱共享[C]//第十八届卫星通信学术年会.北京,中国:军事科学院系统工程研究院,2022: 238–246.
Hu L J, Hu X H, Liu Z X, et al. Spectrum Sharing for Next Generation Radio Network on NOMA and CR[C]//The 18th Annual Satellite Communications Academic Conference. Beijing, China: Systems Engineering Institute of the Academy of Military Sciences, 2022: 238–246.

[16] Kang X, Liang Y C, Garg H K, et al. Sensing-Based Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4649–4654.

[17] 王威, 李祖广, 吴启晖. 基于区块链的动态频谱共享接入技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(2): 26–34.
Wang W, Li Z G, Wu Q H. Dynamic Spectrum Sharing Access Technology based on Blockchain[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(2): 26–34.

[18] Sheng T, Zhang W, Ding W, et al. Dynamic Spectrum Sharing and Aggregation Scheme based on Deep Reinforcement Learning[C]//2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2022: 9825001.

[19] Höyhtyä M, Mämmelä A, Chen X, et al. Database-Assisted Spectrum Sharing in Satellite Communications: a Survey[J]. IEEE Access, 2017, 5: 25322–25341.

[20] 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.
Qu C X, Mao H B, Xu C, et al. Spectrum Sharing Technology for Satellite-Terrestrial Integrated Networks towards 6G [J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(4): 50–56.

[21] Xu T, Li Z, Ge J, et al. A Survey on Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2014, 8(11): 3751–3774.

[22] Kaur R, Buttar A S, Anand J. Spectrum Sharing Schemes in Cognitive Radio Network: a Survey[C]//2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India: IEEE, 2018: 8474662.

[23] Alias D M, Ragesh G K. Cognitive Radio Networks: a Survey[C]//2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). Chennai, India: IEEE, 2016: 7566489.

[24] Zhang L, Wei Z, Wang L, et al. Spectrum Sharing in the Sky and Space: a Survey[J]. Sensors, 2023, 23(1): 342.

[25] 刘艺璇. 基于CR-NOMA的星地一体化网络性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
Liu Y X. Performance Analysis of Integrated Satellite-Terrestrial Networks Based on CR-NOMA[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[26] Liu X, Lam K Y, Li F, et al. Spectrum Sharing for 6G Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks Based on NOMA and CR[J]. IEEE Network, 2021, 35(4): 28–34.

[27] Zhang X, Guo D, An K, et al. Performance Analysis of NOMA-Based Cooperative Spectrum Sharing in Hybrid Satellite-Terrestrial Networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 172321–172329.

[28] Liu R, Guo K, An K, et al. NOMA-Based Integrated Satellite-Terrestrial Relay Networks under Spectrum Sharing Environment[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(6): 1266–1270.

[29] Le A T, Ha N X, Do D T, et al. Enabling NOMA in Overlay Spectrum Sharing in Hybrid Satellite-Terrestrial Systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56616–56629.

[30] Xu T, Xu Y, Zhou T, et al. NOMA-Based Spectrum Sensing for Satellite-Terrestrial Communication [J]. China Communications, 2023, 20(4): 227–242.

[31] 谢冰玉. 基于NOMA的星地一体化网络动态频谱共享技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Xie B Y. Research on Dynamic Spectrum Sharing Technology of Satellite-Ground Integrated Network based on NOMA [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

[32] Zhang X, Guo D, An K, et al. Auction-Based Multichannel Cooperative Spectrum Sharing in Hybrid Satellite-Terrestrial IoT Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 7009–7023.

[33] Zhang Y, Zhang H, Zhou H, et al. Resource Allocation in Terrestrial-Satellite-Based Next Generation Multiple Access Networks with Interference Cooperation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(4): 1210–1221.

[34] Zhang Z. Research on the Performance of Overlay /

Underlay Cognitive Radio Waveforms in Different Channels[C]//2021 9th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE). Changsha, China:IEEE, 2021: 9493626.

[35] Feng Y, Jiao B, Song L. Satellite-Based Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Sharing in Ground-Located CRNS[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 57(1): 105–117.

[36] Jia M, Liu X, Gu X, et al. Joint Cooperative Spectrum Sensing and Channel Selection Optimization for Satellite Communication Systems based on Cognitive Radio: Cognitive Radio Satellite Joint Cooperative Spectrum Sensing[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017, 35(2): 139–150.

[37] Yu B, Zhang S, Ni Z, et al. DRL-Based Underlay Dynamic Spectrum Access for Cognitive Satellite Networks under Spectrum Sensing Errors[C]//2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). London, United Kingdom: IEEE, 2023: 10012830.

[38] Liu Z, Lv W, Ren X. Spectrum Allocation Scheme based on Stable Matching in Hierarchical Cognitive Satellite Network[J]. IEEE Access, 2022, 10: 134549–134556.

[39] Liu X, Lam K Y, Li F, et al. Spectrum Sharing for 6G Integrated Satellite-Terrestrial Communication Networks based on NOMA and Cognitive Radio[EB/OL]. (2021-01-27)[2025-03-30]. https://arxiv.org/abs/2101.11418

[40] Tang F, Chen L, Li X, et al. Intelligent Spectrum Assignment based on Dynamical Cooperation for 5G-Satellite Integrated Networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 523–533.

[41] Wang C, Liu N. Research on Software Defined Spectrum Sharing Cognitive Multi-Beam Satellite Communication System[C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Shenyang, China: IEEE, 2019: 598–601.

[42] 徐蕊. 基于区块链的频谱共享技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2024.
Xu R. Research on Blockchain based Spectrum Sharing Technology[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2024.

[43] Wang C, Liu N. Research on Spectrum Sharing of Cognitive Satellite Network based on Blockchain[C]//2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha, China:IEEE, 2021: 9532188.

[44] Wang Z, Cao M, Jiang H, et al. Blockchain-Enabled Dynamic Spectrum Sharing for Satellite and Terrestrial Communication Networks [EB/OL]. (2024-08-04)[2025-03-30]. https://arxiv.org/abs/2408.02013

[45] Wang L, Zheng Y, Zhang Y, et al. Secure Spectrum Sharing for Satellite Internet-of-Things based on Blockchain[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131(1): 357–369.

[46] Jia M, Zhang X, Sun J, et al. Intelligent Resource Management for Satellite and Terrestrial Spectrum Shared Networking Toward B5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 54–61.

[47] Wu R, Li Z, Xie Z, et al. Intelligent Spectrum Sharing Strategy for Integrated Satellite-Maritime Heterogeneous Mobile Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 6780–6794. [LinkOut]

[48] Hsu Y H, Lee J I, Huang L Y, et al. A DRL-Based Spectrum-Sharing Scheme for GEO-LEO Co-Existing Satellite Networks[C]//2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Singapore, Singapore:IEEE, 2024: 10683651.

[49] Hilario-Tacuri A, Maldonado J, Revollo M, et al. Bit Error Rate Analysis of NOMA-OFDM in 5G Systems with Non-Linear HPA with Memory[J]. IEEE Access, 2021, 9: 83709–83717.

[50] Auyo A M, Babale S A, Bello L M. Effect of Inspired CR-NOMA Power Allocation on Bit Error Rate for Three User NOMA System[C]//2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON). Lagos, Nigeria:IEEE, 2022: 9803163.