

6G 卫星物联网随机多址接入技术发展与展望

丁飞¹ 赵芝因¹ 宋爱国² 潘志文³ 张婷婷⁴

¹(南京邮电大学通信与网络技术国家地方联合工程研究中心 南京 210003)

²(东南大学空间科学与技术研究院 南京 210096)

³(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

⁴(中国人民解放军陆军工程大学指挥控制工程学院 南京 210018)

(dingfei@njupt.edu.cn)

Random Multiple Access Technologies for 6G Satellite Internet of Things: Development and Prospects

Ding Fei¹, Zhao Zhiyin¹, Song Aiguo², Pan Zhiwen³, and Zhang Tingting⁴

¹(National Local Joint Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)

²(Institute of Space Science and Technology, Southeast University, Nanjing 210096)

³(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

⁴(School of Command and Control Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210018)

Abstract Satellite Internet of things (SatIoT), positioned as the core evolutionary direction in sixth-generation (6G) mobile network architectures, is establishing a globally seamless ubiquitous IoT connectivity framework with integrated service capabilities through space-terrestrial collaborative networking technologies. Multiple access technology, as a key technology supporting dynamic access for large-scale users in SatIoT, primarily aims to achieve on-demand, orderly, and reliable concurrent access services for massive user terminals through intelligent allocation mechanisms of wireless resources. We review the evolutionary trajectory of ALOHA-based multiple access technologies, categorize existing access technologies into two major technical lineages—slotted random multiple access and unslotted random multiple access—from the perspective of time constraints on data transmission, and conduct a classified analysis of their technical characteristics, delving deeply into the physical layer implementation principles and protocol properties of various technical approaches. Regarding the direction of convergent innovation, we summarize the design paradigms and research achievements of novel hybrid random multiple access technologies, and collate cutting-edge research progress from dimensions such as protocol architectures, spectrum sensing, and service modeling. Finally, we identify future technological directions and development trends in areas including on-demand access control, simplify random multi-access, multi-access edge computing (MEC)-enabled random multi-access, and data-model co-driven model and scenario verification.

Key words 6G; satellite Internet of things; ALOHA; random multiple access; multi-access edge computing

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-06-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(92067201); 国家自然科学基金项目(61871446); 江苏省重点研发计划项目(BE2020084-1); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(25KJA510003); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(DZXX-008)

This work was supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (92067201), the National Natural Science Foundation of China (61871446), the Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2020084-1), the Major Project of the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (25KJA510003) and the Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province (DZXX-008).

摘要 卫星物联网作为第6代移动通信(6G)网络架构的核心演进方向,正通过星地协同组网技术构建全球无缝覆盖的物联网泛在连接体系与综合服务能力.多址接入技术作为支撑卫星物联网大规模用户动态接入的关键技术,其核心目标在于通过无线资源的智能化分配机制,实现海量用户终端按需、有序、可靠的并发接入服务.梳理了基于ALOHA协议的多址接入技术演进脉络,从数据发送的时间约束维度出发,将现有接入技术划分为时隙随机多址接入与非时隙随机多址接入两大技术谱系,并对其技术特征进行分类解析,深入剖析了各技术方案的物理层实现原理与协议特性.针对融合创新方向,总结了新型混合随机多址接入技术的设计范式与研究成果,从协议体制、频谱感知、业务建模等维度梳理了前沿研究进展.最后,从按需接入控制、极简随机多址接入、多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)融合的随机多址接入、数据-模型联合驱动模型与场景验证等方面指出了未来研究的技术方向和发展趋势.

关键词 6G; 卫星物联网; ALOHA; 随机多址接入; 多接入边缘计算

中图法分类号 TP926.1

DOI: 10.7544/issn1000-1239.202440839 CSTR: 32373.14.issn1000-1239.202440839

陆地80%以上区域与海洋95%以上区域均存在覆盖难题,卫星物联网作为融合的新型网络架构,能够支持陆地与海洋区域的跨域连接服务,满足6G“全覆盖”愿景^[1].我国《“十四五”发展规划和2035年远景目标》明确提出建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的智能化综合性数字新型基础设施,大力推进卫星物联网技术研究和重大工程建设的发展目标^[2].在卫星物联网体系下,卫星作为地面网络的补充或备份,可以提供增强的跨域通信、定位导航与对地观测等能力;同时,地面网络作为卫星网络更靠近用户的服务站点,能够提供时延更小、成本更低、灵活性更高的通信服务.

第3代合作伙伴计划(3GPP)在R17标准中确定了“窄带物联网支持NTN”“卫星融入5G架构”“卫星与5G融合的网络管理”“卫星网络的核心网”等内容,为卫星物联网建设奠定了标准技术基础^[3].国际电信联盟(ITU)发布的《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》^[4]和我国IMT-2030(6G)推进组发布的《6G典型场景和关键能力》白皮书^[5],均指出6G将在5G的eMMB, uRLLC, mMTC等典型场景下继续深化,拓展感知-通信-计算的融合以及智能服务新场景,从而为6G的演进与发展指明了方向.

多址接入技术作为卫星物联网的核心技术之一,主要解决地面用户在同一频段、相同波束内的动态接入问题,通过合理的资源分配和信号处理,避免碰撞和干扰,充分提高频谱的利用率.多址接入技术可以分为正交多址接入(orthogonal multiple access, OMA)、非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)和随机接入(random access, RA)三类^[6]: 1) OMA技术适用于以短数据包业务为主的网络环境,但过多的

资源分配过程会带来较大的信令开销,影响系统效率;由于正交资源有限,难以承载海量终端,因此OMA技术不利于同时支持大规模连接. 2) NOMA方案打破了正交资源分配的制约,且能够提升系统的连接数和网络容量,但实际系统实现时需额外增加信令开销;同时,考虑到卫星网络相较于地面网络的信道衰落更复杂,将NOMA技术直接用于卫星物联网仍有挑战. 3) RA技术无需事先分配资源,用户需要在需要发送数据时,按照设定的时隙占用概率或策略,自主选择卫星信道资源进行发送,因此RA技术可以提高信道资源的动态利用,能够适应用户数量和业务量的变化,适用于大规模用户接入场景,但也存在着冲突和重传的可能,从而影响整体系统的吞吐量和丢包率.

目前,全球主要国家正竞相开展6G技术的预研和布局,为此,梳理卫星物联网主流的多址接入技术原理、特点与演进,对于6G卫星物联网多址接入技术的创新设计意义重大,依据新型网络架构特点与场景需求进行技术优化与改进,真正实现卫星物联网的全域覆盖、万物智联.本文首先回顾与综述了卫星物联网多址接入技术,详细介绍了典型随机接入技术的实现过程与技术特征,为融合型随机接入技术奠定了基础条件.然后详细探讨了新型融合型随机接入技术的原理与应用效果.最后,对卫星物联网随机多址接入技术的发展趋势展开讨论.

1 6G 卫星物联网架构与多址技术发展分析

1.1 6G 卫星物联网架构

相较于5G通信系统,6G卫星物联网通过终端-

网络-平台-管理 4 维架构的深度融合, 构建起具备资源耦合、内在安全、星间协同的星地一体化通信范式. 该系统将实现百亿级节点接入规模, 其终端设备

数量预计呈现指数级增长态势. 从逻辑层面划分, 6G 卫星物联网可分为地面承载网、空间承载网和分布式终端等, 如图 1 所示.

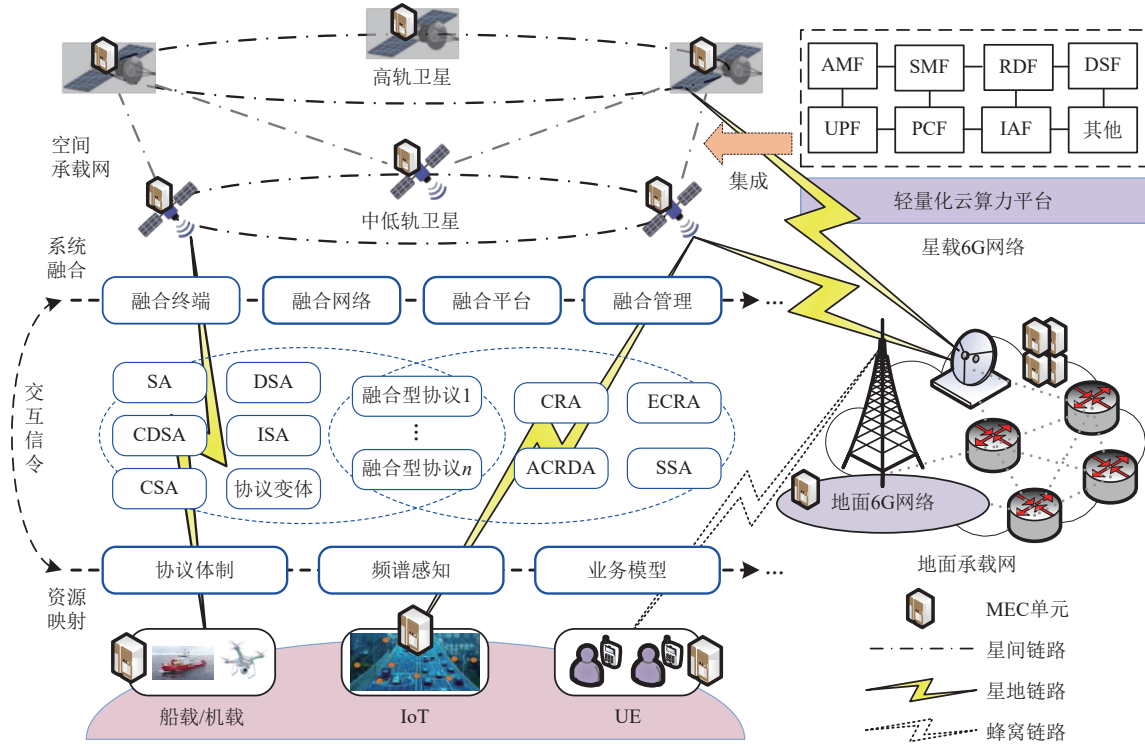


Fig. 1 6G satellite-based IoT satellite-ground integrated access network
图 1 6G 卫星物联网星地一体化接入网络

6G 卫星物联网将地面承载网和空间承载网植入 6G 核心网功能, 实现整个系统接入点、频率、接入网和核心网的统一规划和设计, 为用户提供高质量、安全和一致性的服务. 在 6G 星地一体化接入网络的融合终端、融合网络、融合平台和融合管理的集成架构下, 提供地面接入传输资源与在轨卫星系统资源的映射处理; 在统一协议体制下, 支持宽窄带融合接入传输、通信定位一体化, 满足星地融合多场景多业务应用需求; 分布式的终端、地面网络和在地卫星集成的多接入边缘计算能力, 为各行业提供开放性、高效率通信传输、增强型导航定位和在轨增值服务, 实现天地一体化的协同计算平台, 赋能垂直行业应用.

1.2 多址技术分类

传统 OMA 技术从时域、频域、码域和空域等维度进行无线资源分割, 以满足多用户的并发服务需求, 代表性技术包括: 频分多址 (frequency division multiple access, FDMA)^[7]、时分多址 (time division multiple access, TDMA)^[8]、码分多址 (code division multiple access, CDMA)^[9]、正交频分多址 (orthogonal

frequency division multiple access, OFDMA)^[10]、空分多址 (space division multiple access, SDMA)^[11] 等. 由于多用户接入的非一致性, 传统 OMA 接入方式下的资源利用率相对要低. 此外, 在资源分配方式方面, 按需分配多址接入 (demand assignment multiple access, DAMA)^[12] 按照不同用户的实时接入请求来匹配信道资源, 可提高系统的资源利用率, 但 DAMA 在应对突发业务场景时, 不同用户的频繁请求将导致系统效率降低.

NOMA 技术为发送端定义了功率域和码域, 允许不同用户在相同频率或时刻发送数据. 然而, 同时发送可能会导致接收端面临多用户间的干扰. 为了有效应对多用户接入请求, 接收端采用串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 或最大似然检测 (maximum likelihood, ML) 等方法进行解调, 以确保高效处理多用户接入请求. 代表性的 NOMA 方案包括多用户共享接入 (MUSA)、稀疏码分多址接入 (SCMA) 和图样分割多址接入 (PDMA) 等.

针对 6G 大规模接入需求, 现有多址接入技术需要协调不同用户发送数据的频带/时间等资源, 但接

入点与用户之间的频繁信令交互将导致较大的接入时延,发送端和接收端还需要考虑完整的数据同步和解调等能力.RA技术融合了随机接入与多址传输功能,用户无需与接入点预先协商即可自由竞争信道资源.该技术具有接入灵活、对网络规模无严格限制等优势,因此已成为卫星物联网多址接入领域的一个研究热点.

2 多址接入关键技术

2.1 时隙随机接入技术

1) 纯ALOHA协议与时隙ALOHA协议

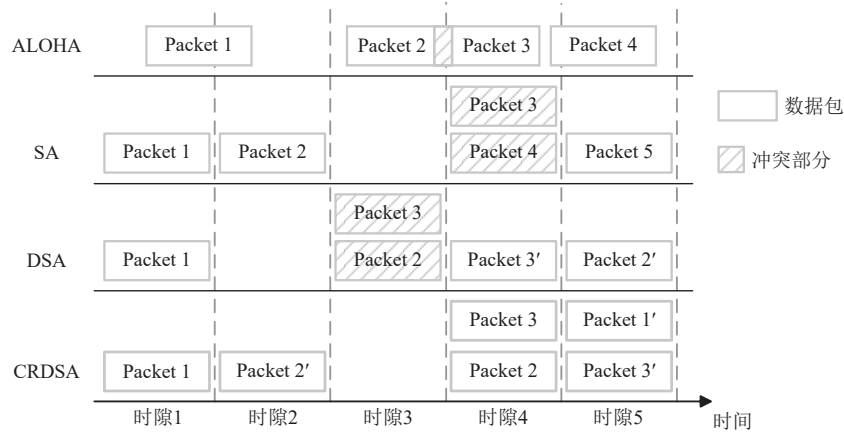


Fig. 2 Comparative chart of data transmission for representative protocols based on ALOHA

图2 基于ALOHA的代表性协议的数据传输对比图

2) 分集时隙ALOHA协议

为缓解包碰撞导致数据丢失的问题,分集时隙ALOHA(diversity slotted ALOHA, DSA)^[19]协议被提出.该方案具备多频信道分集的能力,即能够生成2个副本数据包随机传输到不同频率信道上(如图2所示),以增加成功传输的概率.DSA协议适用于低负载场景,当吞吐量略低于最大值,则该协议可提供更好的延迟性能.但在高负载环境下信道占用率显著上升,易导致丢包率过大以及延时过大等问题.

3) 竞争解决DSA协议

由于DSA协议未有效利用重复包所携带的信息,Casini等人^[20]提出了竞争解决DSA(contention resolution diversity slotted ALOHA, CRDSA)协议.该协议的独特之处在于,每个数据包携带了指向其副本包所在时隙位置的信息(如图2所示),当数据包可以被成功解码时,可利用SIC技术将其指针指向的副本消除,降低碰撞概率.

因此,CRDSA相比DSA可以较好地缓解高负载

ALOHA协议是一种最基本的随机多址接入技术,用户可在有数据传输需求时立即发送数据.然而,由于缺乏接入控制机制,该协议容易引起数据包冲突,如图2所示.文献[16]中计算得出纯ALOHA的最大归一化吞吐量仅达到0.186,并且随着用户数和负载的不断增长,其性能会急剧下降.

时隙ALOHA(slotted ALOHA, SA)协议将时间段划分为等长的时间片段,数据传输前先进行收发端的时间同步操作,让待传数据的起始时刻与时隙的起始时刻保持一致,从而可以降低数据冲突概率,提高接入系统的吞吐量^[17].文献[18]得出SA的最大归一化吞吐量可以达到0.368,约为纯ALOHA方案的2倍.

场景下的丢包问题,提高了系统吞吐量并增进了信道利用率,其最大归一化吞吐量可达到0.55^[20-21].

4) 不规则重复时隙ALOHA协议

Liva^[22]以CRDSA协议为基础保留副本指针及SIC技术,提出了不规则重复时隙ALOHA(irregular repetition slotted ALOHA, IRSA)协议,采用概率分布函数来确定每个用户发送数据的副本数量,非规则重复产生副本.同时,引入二分图对不同用户数据的传输时隙分配进行优化选择,如图3所示.

图3中 $B_i(i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 表示用户节点数据包集合, S 表示接收端时隙节点集合,边 E 代表用户节点与接收端之间存在一个数据包副本.如图3的步骤①所示, B_2 在 S_2 时隙中未发生碰撞,因此 B_2 可以在 S_2 时隙中被正确接收和解码(图3的步骤②).图3的步骤③中利用 B_2 携带的信息和SIC技术,消除 B_2 在 S_1 时隙的信号后,从 S_1 时隙中可分离出 B_1 信号.类似地,如图3的步骤④⑤所示,可依次将 B_3, B_4 信号正确接收和解码.由文献[22]的研究结果可知,IRSA协议根据信道

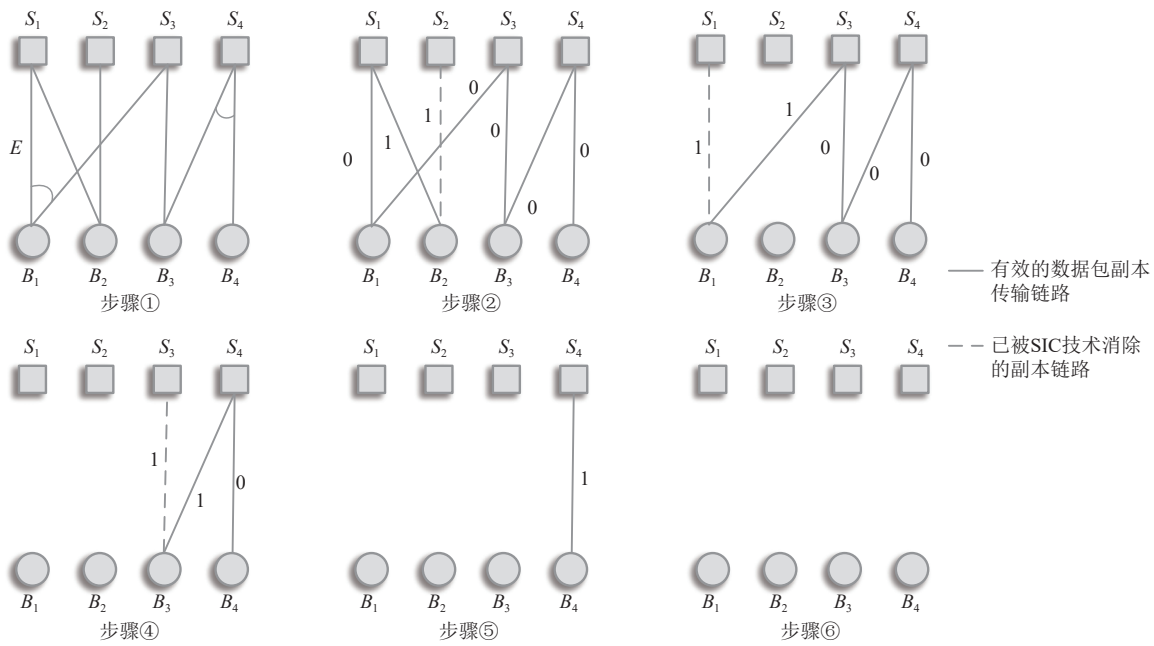


Fig. 3 IRSA dichotomy schematic diagram^[22]

图3 IRSA 二分示意图^[22]

负载动态调整副本的重传次数, 利用未发生冲突的时隙中的消息, 可以消除它的副本所在时隙发生的冲突, 能够在理想情况下实现归一化吞吐量接近 0.97, 在实际实现中接近 0.8.

5) 编码时隙 ALOHA 协议

编码时隙 ALOHA (coded slotted ALOHA, CSA) 协议^[23-24] 是 IRSA 的延伸, 该方案的基本思想是将用户数据包先进行编码和分割后插入 MAC 帧, 采用线性分组对其进行编码然后选择不同时隙发送数据, 接收端通过 SIC 或 ML 方法等来恢复原始数据. CSA 通过对信道环境进行感知并能调整数据帧的封装, 在高速率情况下, 即运行速率大于 1/2 bps 时, CSA 协议必须依赖于具有足够大维度和足够高编码率的分量编码, 数据包被分割的段数越多, 优势越为显著. 在低速率条件下, 即运行速率低于 1/2 bps 时, CSA 协议相较于 IRSA 协议在峰值吞吐量方面具有更大的优势. 然而, 在运行速率小于 1/3 bps 时, CSA 协议提供的增益受到限制, 此时 IRSA 方案由于其简化的协议设计和操作而更为适用^[24].

6) 协议变体

星地一体服务场景多样, 用户并发接入的特点存在明显差异, 研究者们对 ALOHA 相关协议不断改进, 提出了一系列优化后的协议变体, 如表 1 所示. 不同的 ALOHA 协议的改进版本考虑了各自的应用场景和服务性能要求, 对原有协议机制进行了调整或扩展, 以提高系统的工作效能.

为了评估随机接入的系统性能, 很多学者从吞吐量、丢包率、稳定性、时延等不同性能指标对 CRDSA、IRSA、CSA 以及它们的变体开展了大量的性能评估研究, 例如文献 [41-46] 从吞吐量、丢包率和稳定性对 CRDSA、IRSA 以及它们的变体开展了性能评估研究, 文献 [47-48] 从吞吐量、丢包率等指标对 CSA 及其变体开展了性能评估研究.

2.2 非时隙随机接入技术

2.1 节所述的时隙随机接入协议在发送数据包前需做时隙同步, 适用于对时延要求较高的场景, 如实时监控和紧急通信. 但对于卫星-地面协同的物联网系统去做时隙同步, 会消耗较多的信令开销. 非时隙随机接入技术更适用于高动态性场景, 如低轨卫星的大规模用户接入, 其无需用户保持全局时隙同步, 也不需要预先分配信道资源, 支持多用户的信道共享并动态地进行信道竞争和接入^[49].

1) 竞争解决 ALOHA

竞争解决 ALOHA (contention resolution ALOHA, CRA)^[50] 协议为了解决异步接入时数据包存在的部分重叠问题, 每个数据包副本均含有相同的导频序列、净荷数据以及指向其他副本的位置信息. 接收端首先接收并存储整帧的数据流信息, 利用 SIC 技术进行数据解调, 剔除掉数据包副本所在位置处的导频序列及干扰数据. 经连续迭代直至到达设定的最大迭代次数或解调数据包中无有效净荷数据. 如图 4 所示, 经过 2 次迭代后, 用户 3 与用户 4 彼此的数据

Table 1 Improved Protocol Variants

表 1 改进的协议变体

协议	来源	协议变体	流量模型	技术指标	性能效果
基于 CRDSA 协议	文献 [25]	基于滑动窗口的 CRDSA (sliding window based CRDSA, SW-CRDSA)	泊松分布	吞吐量; 时延	使用滑动窗口的方法相比于使用帧的方法, 吞吐量提高了 13%, 且随机接入延迟减少 100 ms 以上.
	文献 [26]	预留时隙 CRDSA (reservation CRDSA, R-CRDSA)	均匀分布	吞吐量; 归一化效率	通过分配特定时隙优化传输, 吞吐量和归一化效率均获得优化, R-CRDSA 的归一化效率在信道负载超过 0.5 Packet/Slot 时略优于 R-SA 方案.
	文献 [27]	多个预留时隙 CRDSA (multiple reservation CRDSA, MR-CRDSA)	均匀分布	时延; 信道利用率	与 R-CRDSA 相比, MR-CRDSA 方案使得卫星终端使用较少的帧数来传输消息, 具有更低的随机接入传输时延和更高的信道利用率.
	文献 [28-29]	基于相关定位的多副本译码 (MARSALA)	均匀分布	归一化吞吐量	与 CRDSA 方案相比, MARSALA 的吞吐量提高了约 1.5 倍, 即: 在低信噪比 (0 dB) 条件下, MARSALA 的归一化吞吐量达到 0.7, 而在较高信噪比 (10 dB) 时的归一化吞吐量可达到 1.4.
	文献 [30]	多频 CRDSA (multi-frequency CRDSA, MF-CRDSA)	泊松分布	峰值功率; 丢包率	相较于 TDMA 系统, MF-CRDSA 对终端峰值功率需求降低了一个数量级以上, 且信道负载设置较大时的系统丢包性能相对较优.
	文献 [30]	扩频 CRDSA (spread spectrum CRDSA, SS-CRDSA)	泊松分布	丢包率; 能量效率	SS-CRDSA 相比 CRDSA, 前者在信道负载设置较小时的丢包率显著降低; 能量效率相比 RA 方案提高了 33%.
	文献 [30-31]	多频扩频 CRDSA (multi-frequency SS-CRDSA, MF-SS-CRDSA)	泊松分布	丢包率; 能量效率	继承了 FDMA/CDMA/TDMA 的组合优势, 信道负载在不同设置时的丢包性能和能量效率均优于 MF-CRDSA 和 SS-CRDSA 方案.
基于 IRSA 协议	文献 [32]	适应包长的 CRDSA (adaptive packet length CRDSA, APL-CRDSA)	均匀分布	归一化吞吐量; 误码率; 信道负载	APL-CRDSA 的最大归一化吞吐量约为 0.8, 为传统 CRDSA 的 1.5 倍; 相较于无捕获效应的情况, APL-CRDSA 的误码率较低, 且对于 10^{-2} 的目标误码率, 该方案信道负载提升 1.2 倍.
	文献 [33]	带有优先级的 IRSA (IRSA with priority, P-IRSA)	$\Lambda(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$	信道效率; 丢包率; 归一化吞吐量	信噪比为 0 dB, 6 dB, 12 dB, 15 dB 时, 信道效率分别为 0.52, 0.58, 0.65, 0.70; 丢包率显著低于 S-ALOHA, IRSA, AC-CRDSA, 在高流量负载下保持在 10^{-2} 左右; 归一化吞吐量达到 0.7.
	文献 [34]	反馈辅助的 IRSA (feedback-aided IRSA, F-IRSA)	$\Lambda(x) = 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8$	传输能量; 吞吐量	相比 IRSA 方案, 在信道负载占比为 0.7 时, F-IRSA 可将单用户的平均传输次数减少 1 次, 节约终端用户 27.78% 传输能量, 进而提高了随机接入的吞吐量.
	文献 [35]	增强型的 IRSA (enhanced IRSA, EIRSA)	$\Lambda(x) \triangleq \sum_l \Lambda_l x^l$	平均副本数; 吞吐量	相比 IRSA 方案, 信道负载为 0.1 时, 平均副本数从 IRSA 的 3.6 降低为 2.2; 当负载为 0.8 时, 单位功率吞吐量比 IRSA 高约 0.02.
文献 [36-37]	能量收集 IRSA (energy harvesting IRSA, EH-IRSA)	$\Lambda(x) \triangleq \sum_l \Lambda_l x^{l-1}$	归一化吞吐量; 信道负载	丢包率为 10^{-2} 约束条件下, 归一化吞吐量可达 0.87, 随机接入的信道负载可升至 0.88.	
基于 CSA 协议	文献 [38]	多时隙编码 ALOHA (multi-slot coded ALOHA, MuSCA)	随机分布	归一化吞吐量; 丢包率	对比 CRDSA 方案: 当信噪比为 10 dB 时, MuSCA 归一化吞吐量提高了 85% (达 1.28); 信道负载小于 1.3 时, MuSCA 协议的丢包率在 10^{-2} 以内, 显著低于 SA 与 CRDSA 方案.
	文献 [39]	帧异步 CSA (frame asynchronous CSA, FA-CSA)	$\Lambda(x) \triangleq \sum_l \Lambda_l x^{l-1}$	丢包率; 平均时延	信道负载在 0.85 范围内时, FA-CSA 相比基于标准帧同步的 CSA 方案, 丢包率和随机接入平均时延均获得优化.
	文献 [40]	基于擦除信道的 CSA	泊松分布	信道负载	相比传统 CSA 方案, 当信息擦除率设为 13.5% 时, 该方案可将信道负载从 0.42 提升至 0.79.

包产生干扰, 出现闭环冲突, 无有效净荷数据, 结束 SIC 解调过程. 与 CRDSA 和 IRSA 相比, CRA 协议没有时隙要求, 并消除了对数据包大小的限制. 相比于传统 SA 方案, 该方法无需在时隙上同步, 而是允许在长时帧内同步, 从而降低了对同步精度和时序的要求. 在没有前向纠错的情况下, CRA 相对于 SA 方案的最大归一化吞吐量可从 0.186 提高到 0.32; 利用前向误差校正和功率平衡处理, 在高信噪比的条件下, 其最大归一化吞吐量可达 0.92^[50]. 针对数据包重

叠数据的优化处理能够很好地缓解接入冲突问题, 在低负载场景下 CRA 的误码率可控制在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ^[50].

由于 CRA 协议无法应对闭环数据冲突, 难以正确解调用户 3 和用户 4 的数据包. Clazzer 等人^[51]对 CRA 协议做了改进, 提出了增强的竞争解决 ALOHA (enhanced CRA, ECRA) 协议, 来提高冲突解决效果. ECRA 在解调时, 第 1 步解调过程和 CRA 相同, 通过寻找有效净荷数据和 SIC 算法来解调所有用户的数据包, 第 2 步将用户多个副本中未受干扰的数据包

部分组合成一个新数据包,重新解调以解决环路问题.具体地,如图4所示,ECRA将副本3a(2)部分与副本3b(1)部分的数据包片段进行组合,可以正确解调出用户3数据;同理,将副本4a(1)与副本4b(2)部分的数据包片段进行组合,能够解调出对应用户4数据.但通过多个副本创建新的组合包方案并非适用于所有场合,例如当数据包所有部分都受到干扰,此时环路问题无法被解决.性能方面,ECRA在频谱效率和归一化信道容量方面优于CRA随机接入方案,ECRA的归一化信道容量可以达到MAC信道容量的75%^[51].并且,ECRA方案在信道负载为0.6时的丢包率可稳定控制在 10^{-4} 以内^[51].

2) 异步竞争解决分集 ALOHA

异步竞争解决分集 ALOHA (asynchronous contention resolution diversity ALOHA, ACRDA)^[52] 协议为用户接入定义了虚拟时隙、虚拟帧及帧边界.如图5所示,单个时隙长度为 T_s ,每个虚拟帧包含 N 个虚拟时隙,则该帧持续总时长为 $T_{\text{frame}} = N \times T_s$,而虚拟帧间的时

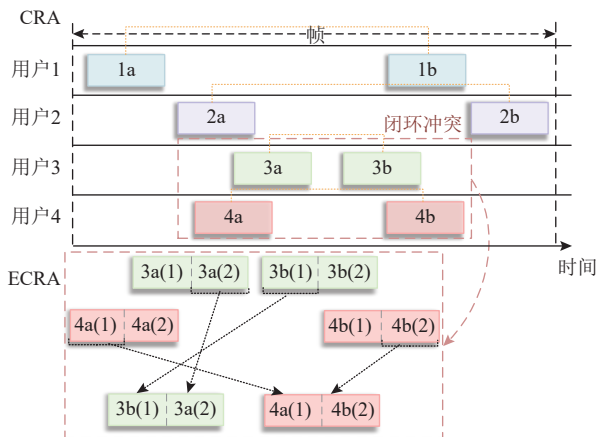


Fig. 4 Schematic diagram of CRA and ECRA

图4 CRA与ECRA示意图

间偏移是随机的.在图5中,每个用户在同一个虚拟帧中有3个数据包副本,分布在不同的时隙中.在ACRDA中,接收端首先将所有发送的数据保存在存储介质中,并使用滑动窗口 W 迭代处理异步到达的数据包,解调完毕后滑动窗口向右平移,以此类推,直至最终解调完所有用户数据.与CRDSA不同,ACRDA对滑动窗内的各副本与虚拟时隙之间的关系进行了编码,使得在解调时能够有序地解析出净荷数据.

ACRDA协议的异步性质降低了破坏性循环的发生概率.在性能方面,ACRDA协议降低了约33%的解调器复杂性,并缩短了约2倍的传输延迟,相较于CRDSA方案,ACRDA协议的吞吐性能稍优,同时允许对共享介质进行真正异步的访问^[52].

3) 扩频 ALOHA

扩频 ALOHA (spread spectrum ALOHA, SSA) 协议^[53] 融合了扩频技术,在发送端对发送的数据进行扩频处理,将原本占用较窄频段的信号加载到更宽的频段上进行传输,从而提高了系统容量和抗干扰能力.直接序列扩频调制是常用的扩频技术,如图6所示,其工作原理为将扩频序列信号与待传输的数据相乘,对窄带信号进行调制,使其频谱扩展到相对宽的频带上.恢复原信号时,接收端使用相同的伪随机序列进行关联即可.

增强型扩频 ALOHA (enhanced spread spectrum ALOHA, E-SSA)^[54] 协议和最小均方误差增强型扩频 ALOHA (minimum mean square error plus E-SSA, ME-SSA)^[55] 协议是 SSA 协议的变体.其中, E-SSA 与 SSA 在发送端的处理是一致的,而 E-SSA 为接收端引入了接收功率不平衡与 SIC 处理,可以更好地提高系统的吞吐量,特别是能适应大容量卫星下的高负载通信环境; ME-SSA 是 E-SSA 的增强版本,在接收端

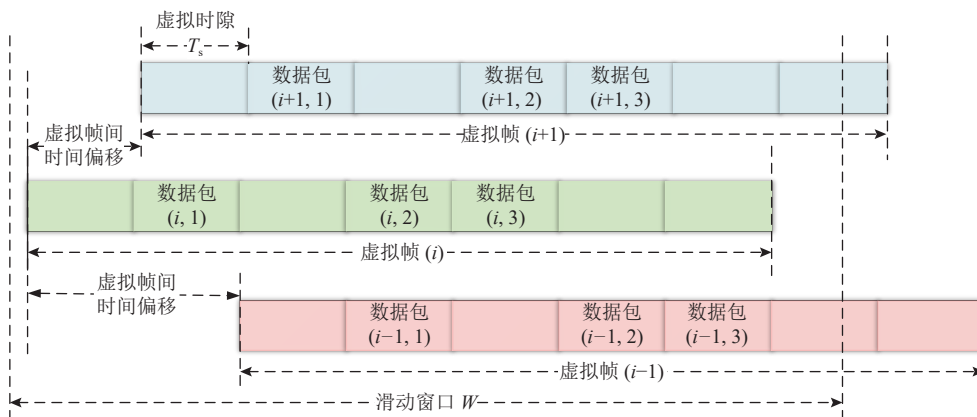


Fig. 5 Schematic diagram of ACRDA access

图5 ACRDA接入示意图

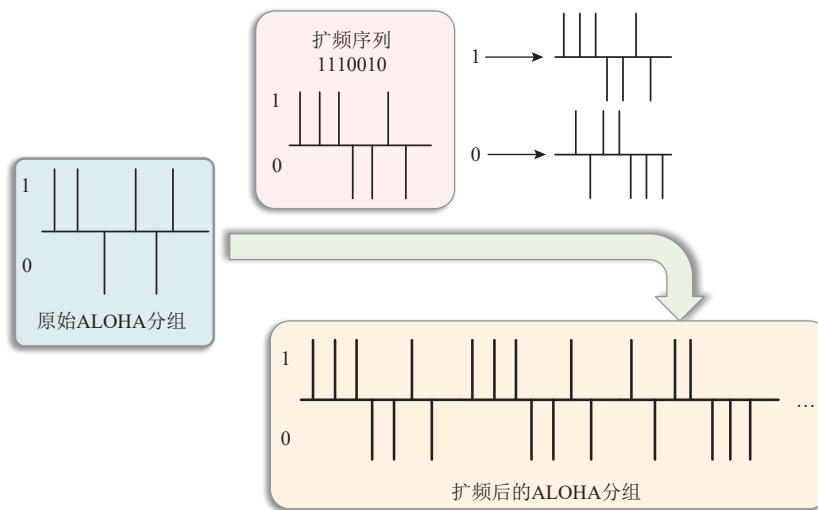


Fig. 6 Schematic diagram of direct sequence spread spectrum principle

图6 直接序列扩频原理示意图

的SIC处理前先执行最小均方误差检测,可以较好地处理数据冲突问题,进而可以进一步改善系统的吞吐效率.

2.3 新型融合随机接入技术

新型融合随机接入在协议体制、频谱感知、业务建模等方面具有多项创新.在协议体制改进方面,新型接入方案采用了灵活的协议设计,允许终端设备根据不同应用场景和网络拓扑动态选择接入方式,以满足用户需求和网络状态的变化.在频谱感知方面,新型融合随机接入引入了博弈论、深度学习等自适应调整的机制,能够根据网络负载和信道条件实时感知并调整资源分配策略,充分利用多用户之间的协作和资源共享,有效地提高信道利用率,应对网络拓扑和负载突变等情况.在业务建模方面,通过对信道模型进行建模与分析,更准确地评估系统性能,优化资源分配策略,并设计有效的调度算法.此外,信息年龄(age of information, AoI)作为评估数据时效性的核心指标,对于远程监控、紧急通信和实时导航等应用场景至关重要,系统在满足AoI条件下进行数据更新和资源调度,优先传输最新且最关键的信息,从而显著提升整体服务质量和用户体验^[56].

2.3.1 协议体制

传统多址接入技术在应对多用户接入需求时面临局限,用户竞争信道易导致时延增加和信令开销变大.新型随机接入技术通常采用按需或动态分配时隙的协议,根据用户实际需求和网络实时状态灵活分配传输资源,从而可以获得更优的通信效率,如表2所示.针对大规模机器类通信场景,文献[59]评估了随机接入成功率下不同终端数的AoI指标,结

合AoI的按需接入方案能显著提升终端接入数量,优化系统性能.NOMA技术使多用户能在同一信道资源上并行传输,通过整合随机接入和数据传输,可以实现高效的免授权接入^[60-63].与未使用NOMA的SA随机接入相比,系统吞吐量获得较大提升.

表2中基于协议体制改进的新型随机接入技术融入了优先级管理、信息时效性、迷你时隙阈值以及NOMA传输等因素,提供了更加灵活和高效的通信接入手段,提升了系统吞吐率、降低时延、优化设备接入流程以及提高资源利用效率,推动随机多址技术向适应性更强、效率更优、智能化程度更高的方向发展.但引入NOMA及其他接入控制机制,需要复杂的信号处理,增加了计算复杂度和功耗.卫星终端的能量有限,如何在保证性能的同时降低功耗是一个关键挑战.

2.3.2 频谱感知

动态频谱感知与接入技术是实现卫星网络高效频谱利用的关键,通过检测不同信道在不同环境下的质量表现,可实现对接入信道与实际环境的动态匹配,设计系统匹配规则优化信道分配.文献[65]提出了一种基于动态多频谱感知的信道接入优化算法,该算法通过在卫星信道状态为空闲或繁忙时分别赋予不同概率接入授权频谱,优化了频谱感知结果不确定性导致的频谱资源浪费问题.然而,现有研究通常假定认知用户能够实现对多条授权频谱的遍历感知,忽略了认知用户硬件条件和功率资源的有限性.

研究者将博弈论引入随机接入领域,为解决资源分配问题提供了一个新的视角.竞争有限的通信资源(例如前导码)可被建模为一个非合作博弈问题^[66].

Table 2 Novel Random Access Techniques Based on Protocol Regime Improvement
表 2 基于协议体制改进的新型随机接入技术

接入技术	来源	应用场景	类别	实现原理	性能指标	性能效果
融合优先级的 R-ALOHA (PR-ALOHA)	文献 [57]	车联网	按需+随机	PR-ALOHA 将终端业务划分为高、低 2 级, 预留部分时隙用于高优先级业务, 低优先级业务工作于竞争时隙.	误码率; 数据传输率	高优先级时隙数占总时隙数的 25% 时, 误码率为 0.001; 当误码率低于 5×10^{-3} 时, 成功接收的数据包数量与预期接收的数据包数量之比保持在 96% 以上.
考虑信息年龄的随机接入 (ADRA)	文献 [58]	远程监控	按需+随机	利用离散马尔可夫链模拟物联网设备数据的信息年龄, 当信息存活时间超过阈值时, 以设定概率进行信道访问.	AoI	相比于现有其他与 AoI 无关的随机接入, 平均 AoI 降低约 25%, 并随用户设备数量的提高更具优势.
迷你时隙阈值 ALOHA (MiSTA)	文献 [59]	大规模机器类通信	按需+随机	综合信息年龄和成功反馈状态, 设定迷你时隙, 信息年龄内的用户在迷你时隙内以设定概率接入访问, 成功反馈后触发发送数据任务.	AoI; 吞吐量	MiSTA 获得的最佳平均 AoI 约为传统 SA 的 1/3, 更适应高负载场景; 普通阈值 ALOHA 的吞吐量相比 SA 提升 37%, 而 MiSTA 方案可提升至 53%.
免授权 NOMA (GF-NOMA)	文献 [60]	大规模机器类通信	NOMA+随机	根据预定的层间接收功率差将小区划分为不同的层, 不需要进行信道估计授权允许每个 NOMA 层中的设备根据其位置和信道状态信息独立地决定自己的传输功率和子信道, 以直接进行数据传输.	计算复杂度; 吞吐量; 信号处理开销	免授权 NOMA 显著降低了接入站点的计算复杂度; 通过联合接入控制和 NOMA 功率级选择算法实现随机接入的碰撞问题且最大化吞吐量; 信号处理开销量降低至原授权方案的 0.0189%.
非协调的随机接入和非正交多址传输 (URAT)	文献 [61]	大规模物联网	NOMA+随机	同时实现随机接入和多址传输 2 个过程, 融合简化用户与接入点之间的交互协议, 信令交互从 26 次减少至 11 次, 并取消建立或恢复无线资源控制连接.	时延; 系统效率; 连接密度	降低了多址接入时延, 最优可降至传统方案的 7%; 提高了系统效率, 增加了可并发服务的终端数.
基于 NOMA 的 IRSA 协议	文献 [62]	大规模机器类通信	NOMA+随机	利用 NOMA 和传输速率计算出各功率级别, 数据包副本以离散功率级别进行传输, 且通过密度演化分析, 优化了不同的功率级数分布.	信道负载; 丢包率; 吞吐量	与 IRSA 方案相比, 设置 3 个功率级别时的信道负载可提高约 3 倍; 丢包率可控制在 10^{-3} ; 随着功率级别数增加, 所提方案的吞吐量可线性增长.
基于 NOMA 优先自适应流量负载的 IRSA 协议 (PATL-NOMA-IRSA)	文献 [63]	大规模紧急与常规设备场景	NOMA+按需+随机	紧急设备 (ED) 和常规设备 (RD) 在发送数据包前通过访问概率共存和区分, 为 RD 执行 ATL 以限制访问概率并保障 ED 吞吐量, 通过密度演化统计对 ED 和 RD 吞吐量进行估计.	吞吐量; 丢包率	单时隙 100, 200, 500 个设备大规模接入场景下, 信道负载率为 0.92 时的丢包率为 10^{-3} 以内, ED 平均传输数据包达到 2.29 个, 提高了 6G 应急系统中设备的可靠性和信道效率.

在这一模型中, 网络中的每个设备 (即博弈参与者) 根据自身的信息和环境状态制定策略, 通过动态策略调整来优化频谱接入效率. 设备根据对网络当前状态的评估以及对未来状态的预测来制定策略, 以实现通信效益的最大化, 如表 3 所示.

博弈论在大规模用户服务时的卫星频谱动态分配中可发挥重要作用, 通过建立动态频谱共享模型, 博弈论能够提高频谱利用率, 实现频谱收益的最大化. 文献 [67] 通过引入平均场博弈理论, 推导出针对大规模设备接入时的最优随机访问策略, 从而优化了大量设备接入的传输延时. 信息物理耦合建模有助于表征大规模设备与不同接入点之间的复杂关系, 从而为设备接入与访问控制提供决策支持 [68]. 在非对称博弈接入场景下, 通过引入强化学习 (reinforcement learning, RL) 算法, 可以提高访问时隙的动态生成和传输成功率 [64]. 纳什均衡理论在非合作博弈中被用来优化设备的传输概率, 以提升链路容量 [69]. 在大规模接入场景中, 结合凸优化的博弈论方法可用于获得各用户可分配最优信道的策略 [70]. 在 5G MEC 和 NOMA 的融合部署系统中, 设计的 2 阶段博弈方法可以在

动态接入时的边缘需求响应与系统能效方面达成综合平衡 [71].

深度学习 (deep learning, DL) 通过构建大规模随机接入系统模型, 利用深度神经网络精确检测用户发射信号并进行接入判断, 从而制定更精准的接入策略, 进而提升系统通信性能和系统鲁棒性. 基于 DL 的新型随机接入技术对比如表 4 所示. 文献 [72] 提出的基于深度神经网络的主动用户检测模型, 通过对接收的 NOMA 信号与活动设备索引之间的非线性映射关系进行学习, 从而提高了 NOMA 非授权接入的成功率. 深度 Dyna-Q 算法能够在大规模接入环境下优化资源分配, 提升了 LEO 卫星物联网系统的随机接入效率 [73]. 深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 算法通过整合用户接入的历史数据和实时反馈信号, 显著增强了卫星物联网系统对大规模动态接入场景的适应能力 [74]. 深度神经网络与退避算法相结合的随机访问策略 [75], 通过学习接收信号的特征来检测随机访问冲突, 有效提升了网络吞吐量并降低了竞争冲突. 此外, 采用公平感知的 DRL 方法智能地调配设备资源, 在确保功耗公平性的同时,

Table 3 Novel Randomized Access Techniques Based on Game Theory

表 3 基于博弈论的新型随机接入技术

来源	应用场景	类别	实现原理	性能效果
文献 [67]	大规模无线传感网络	平均场博弈+接入管理	针对大规模设备连接场景, 通过设备业务行为建模, 引入随机逼近理论管理区域内异构设备的接入数与传输延时, 设计了改进的平均场博弈 (MFG), 以实现信道资源的优化分配.	当物联网接入数大于 400 时, 最佳性能比率可降至 10% 以下; 在同构网络架构下的平均时延性能与传统 MFG 方案基本相同, 而在异构网络中的平均时延降低约 5 ms.
文献 [68]	大规模机器类通信	平均场博弈+信息物理耦合	采用 MFG 推导大规模设备接入时的信息物理耦合关系, 支持模拟区域设备的系统状态分布的演化过程, 最终为各设备分配延迟最优随机访问解.	当接入数为 2 500 时, 与访问类条、队列感知随机访问策略相比, 可减少 15 ms 的延时, 与贪婪策略相比可减少 75 ms 的延时.
文献 [64]	机器类通信	非对称博弈+贪婪/非贪婪算法	针对非正交多址接入场景的 ALOHA 系统, 设计了基于多代理强化学习的贪婪和非贪婪算法, 生成每个用户的随机接入时隙及对应的传输成功率. 贪婪算法为相同用户组分配历史访问时隙; 而非贪婪算法考虑了所有用户的访问公平性.	随机接入信道数设为 20 时, 所提方案 (接入用户数为 40) 的接入传输率与传统方案 (接入用户数为 4) 相接近, 且随着用户数的增加, 所提方案的性能明显优于传统强化学习时隙随机接入方案.
文献 [69]	大规模机器类通信	非合作博弈+纳什均衡	在 5G NOMA 系统中, 提出了基于数据驱动的随机信道接入管理算法, 运用博弈论推导系统可能的纳什均衡及其与技术参数的关系, 以优化物联网设备的传输概率并最大化链路容量.	当用户数为 10 或 100, 考虑 2 个不同的捕获阈值 b . 对于 $b=0.02$, 纳什均衡和最优曲线非常接近, 从全局的角度看, 平衡性能接近最优分配的性能, 而对于 $b=0.2$, 仍然存在一些差距.
文献 [70]	大规模机器类通信	博弈论+凸优化	使用自适应 p 坚持时隙 ALOHA 协议竞争访问共享无线信道, 推导了 MTC 终端随机通道访问概率, 通过对不同 MTC 终端的传输概率进行调整以实现最大化用户预期容量的几何平均值.	所提方案适用于单小区和多小区随机访问的无线物联网, 通过最大化几何平均值来动态调整 MTC 终端的传输概率, 可以获得 250% 的显著公平性增益.
文献 [71]	5G 物联网	2 阶段博弈	面向 5G MEC 与 NOMA 融合部署场景, 提出 2 阶段博弈方法 (EDRGame). 第 1 阶段考虑边缘服务器资源状态与时延约束进行节点选择与接入分配; 第 2 阶段结合各终端发射功率与信道状态, 实现各边缘节点下用户服务组的网络资源分配, 从而兼顾系统的能源消耗与边缘需求响应需求.	EDRGame 与 EDR-Ab, EDR-Ae, EDR-H, EDR-R 方案相比, 用户接入数分别提高了 1.34%, 0.57%, 0.48%, 0.62%, 系统能耗分别降低了 37.51%, 28.91%, 48.77%, 61.46%, 数据速率分别高出 436.26%, 426.23%, 434.90%, 435.63%, 平均服务延迟分别降低了 52.23%, 52.25%, 52.27%, 52.29%.

Table 4 Novel Randomized Access Techniques Based on Deep Learning

表 4 基于深度学习的新型随机接入技术

来源	应用场景	方案	实现原理	效果
文献 [72]	大规模机器类通信	DL+主动用户检测	针对 NOMA 免授权访问, 提出基于神经网络的主动用户检测 (D-AUD) 方案, 建立接收的 NOMA 信号与活动设备索引直接的非线性映射, 提高了高负载用户非授权接入成功率.	D-AUD 方案在不同信噪比 (SNR) 和活跃设备数 (k) 下接入成功率更高, 如: 当 $k=6$ 且 $SNR=20$ dB 时, 该方案的接入成功率为 0.9, 而传统压缩感知方案的接入成功率分别为 0.65 和 0.55.
文献 [73]	大规模机器类通信	DRL	引入深度 Dyna-Q 学习算法设计随机访问控制模型, 为 LEO 卫星物联网的随机接入分配最佳接入时隙, 确保在有限的资源条件下实现高效的随机接入.	与 Q-Learning 相比, 深度 Dyna-Q 学习算法具有更优的接入成功率与系统稳定性, 且当随机接入用户数增加时, 所提算法可以更好满足高密度场景的随机接入需求.
文献 [74]	低轨卫星网络	策略梯度算法+DRL	提出了改进的基于双延迟深度确定性策略梯度 (TD3) 的 DRL 模型, 通过学习 MsgA 通道的历史访问记录, 建立了时隙访问映射关系表, 提升接入系统的服务效率.	对比时分 DRL 方案, 该策略能够将系统的接入成功概率提高 39.12%, 在现实访问需求和单元分布方面具有有效性.
文献 [75]	大规模机器类通信	DL+退避算法	采用深度神经网络对接收信号特征进行学习, 获得接入点的随机访问冲突分布信息, 基于碰撞检测结果, 提出双内容随机访问 (DCRA) 方案, 融入针对性的冲突竞争规避机制, 再通过调整退避算法参数以优化网络吞吐量.	优化调整后退参数后, 成功传输访问请求的概率可达到最优值 0.4. 与 3GPP 定义的当前随机访问协议、避碰随机接入 (CARA) 方案、碰撞分辨率随机接入 (CRRA) 方案相比, 该方案的吞吐量可达到最优值 0.6.
文献 [76]	大规模机器类通信	DRL+公平感知	通过 MTC 设备间的资源调度与交换机制, 智能地调整终端的发射功率和接入策略, 确保功耗公平性的情况下最大限度地提高吞吐量.	所提出的无授权非正交多址方法在终端功耗与吞吐量之间建立平衡, 且吞吐量优于传统随机选择的 NOMA 方案.

最大限度地优化了网络吞吐量^[76].

综上, DL 与 DRL 等方法在卫星物联网随机接入技术研究方面已取得有益进展, 但仍面临以下挑战: 首先, DL/RL 模型的训练依赖大量数据, 样本采集困难可能导致训练不充分, 影响模型精度; 其次, 卫星链路信号容易受到干扰和遮挡, 降低了模型在信号检测和接入判断中的性能与系统鲁棒性; 最后,

DL/RL 模型普遍具有较高的计算复杂度, 而卫星终端设备的资源相对有限, 难以满足模型的实时计算需求, 这也在一定程度上制约了其在卫星物联网中的广泛应用. 为解决上述问题, 一方面, 可以采取或设计轻量级的 DL 模型, 如采用 MobileNet 等轻量级网络架构, 或运用剪枝和量化技术来压缩模型参数, 实施模型蒸馏和知识迁移, 从而减少模型参数数量和

计算量,提升模型的运行效率;另一方面,可以在靠近用户侧部署边缘节点,由边缘节点独立或协同地承担随机接入策略的计算任务,以实现接入效率与终端资源受限之间的优化匹配,进而提升系统随机接入性能。

2.3.3 业务建模

在大规模用户随机接入的场景中,针对网络业务性能分析与建模,有助于设计出高效且稳定的网络协议。排队论方法将随机接入过程抽象为排队系统,借助概率论和随机过程等数学工具对系统性能进行量化分析。文献[77]在非饱和条件下,结合 DCF 分析模型和 M/G/1 排队模型,研究了节点队列间的耦合关系及其对网络时延和吞吐量的具体影响。文献[78]专注于局域网环境,对基于泊松分布和指数分布的 M/M/1 排队模型的流量行为差异进行了对比研究。然而,由于卫星物联网的随机接入过程具有跨区域、业务分布不均与多径效应等典型特点,传统排队论方法在处理卫星物联网随机接入过程的业务性能仿真时存在局限性,需要探索更加先进且适用的建模和分析方法^[79]。

随机网络演算(stochastic network calculus, SNC)能兼顾网络数据流的随机突发特性和网络信道的动态变化,为资源调度提供灵活高效的策略。通过 SNC

建模分析,可获取特定违反概率下的性能边界与统计特性,确保网络设计的服务质量(quality of service, QoS)。SNC 与串联模型的融合,揭示了突发状态和服务速率对延迟的影响,指导流量控制和缓存管理^[80];SNC 结合鞅理论,可推导更精确的跨服务节点的端到端时延上界,表征多跳系统服务能力^[81];基于 SNC 对关键性能指标(如时延、AoI)的尾部分布的分析,能优化功率分配,并达成统计延迟和 AoI 违规概率之间的平衡^[82]。

针对卫星物联网的高动态拓扑、大传播时延以及终端异构性,DL/DRL 通过特征自学习,有效捕捉业务流量的周期性、终端密度分布及信道状态动态性等,可以提升系统随机接入的效率与可靠性。表 5 中,文献[83]提出的基于去噪卷积神经网络(DnCNN)的模型方法,精准提升信道估计,为多址接入提供可靠信道信息。文献[84]结合 DRL、NOMA 与有效带宽理论,动态优化用户配对与功率分配,满足多样化 QoS 需求,增强网络性能;文献[85]提出基于多智能体 DRL 的紧急随机接入信道协议(eRACH),利用低轨卫星轨道规律,实现非平稳网络环境下的高效随机接入,大幅提升吞吐量并降低时延。上述研究可为卫星物联网开展基于数据-模型联合驱动的业务建模与随机接入性能优化提供新的视角和工具。

Table 5 Novel Randomized Access Techniques Based on Service Modeling
表 5 基于业务建模的新型随机接入技术

来源	应用场景	方案	实现原理	性能效果
文献 [81]	超可靠低延迟通信	鞅理论+SNC	在鞅域中基于 SNC 对排队系统进行建模,提出一种带宽抽象方案来评估端到端延迟限制下每个节点的带宽需求。在抽象带宽约束下,为接入网和核心网执行片实例化策略。	对于平均到达负载为 8 Packet/Slot 和 9 Packet/Slot,成功访问概率从 0.85 增加到 0.9 时,不可靠性都大约下降了 1 个数量级。
文献 [82]	超可靠低延迟通信	AoI+NOMA+SNC	提出一种基于 SNC 的统计 QoS 配置 (SQP) 理论框架,通过该框架对 NOMA 辅助的上行链路 xURLLC 网络进行尾部分布分析,并提出了一种 SQP 驱动的功率优化算法,以最小化发射功率的同时满足 xURLLC 在延迟、AoI、可靠性和功耗方面的关键性能指标。	当目标延迟相对松散时,NOMA 可以显著提高资源利用率,节省发射功率并保障用户性能。所提出的 SQP 驱动的功率分配方案总体上优于随机选择策略以及正交多址接入 (OMA) 方案,对于 1.8 ms 的目标 AoI,NOMA 与 OMA 相比的性能改进超过 49.85%。
文献 [83]	大规模多输入单输出低轨卫星通信	DL	提出了基于 DL 的 DnCNN 信道估计算法,通过结合最小二乘估计器和去噪网络,有效降低了 LEO 卫星通信系统中的信道估计误差。	所提出的 DnCNN 模型在低信噪比和高信噪比下都表现出色,信噪比在 0~18 dB 范围内归一化均方误差均小于 0.5。
文献 [84]	超可靠低延迟通信	NOMA+DRL	提出了时延 QoS 约束的用户配对方案。该方案将用户的信道条件和延迟要求设定为状态变量,利用 DRL 算法在给定的功率分配因子下,搜索能够实现最佳性能的最佳用户。	基于 DRL 的用户选择方案能够在每个时隙输出最优动作,相较于 OMA 方案,该方案在接入性能上表现更为优越。
文献 [85]	低轨道卫星接入网络	DRL	提出了 eRACH 的竞争随机接入方案。该协议借助多智能体 DRL 与非平稳网络环境交互,并利用已知卫星轨道模式,实现了无需中央协调和用户间额外通信的随机接入。	与随机接入信道策略相比,eRACH 方案平均网络吞吐量提高了 54.6%,平均接入延迟约降低了 50%。
文献 [86]	低轨道卫星-地面网络	SNC+NOMA+RL	利用 SNC 建模传输延迟,并结合自适应调制和编码技术优化系统延迟。由于信道不确定性和各类误差导致最小化延迟问题呈现非凸特性,提出 RL 辅助的链路自适应方法,以最小化 NOMA 系统传输延迟。	相比无 RL 辅助的算法,该方案平均延迟降低约 20%,提升效果明显;相比 RL 辅助的 OMA 方案,该方案平均链路速率提升约 50%。

3 未来研究展望

预计到2040年6G通感市场设备将超过千亿,智能业务市场将渗透至各领域,未来网络架构将向智慧内生、安全内生、多域融合、算网一体方向发展,并将逐步涌现全域化、感知/通信/计算智能体交互、普遍智能等新业务和新服务^[87].大规模用户、丰富场景下的高质量服务给6G卫星物联网随机多址接入技术及系统应用带来了巨大的挑战,同时也蕴含着新的发展机遇.

3.1 按需接入控制

卫星物联网多模态业务,如时延敏感任务、优先级保障业务、大吞吐量传输以及低功耗监测等,对随机接入机制提出了差异化QoS需求.传统固定接入策略难以适应动态信道环境与异构业务特征,亟需构建面向业务感知的按需接入控制体系.该方向需突破2个关键技术:

1)接入节点的智能选择策略.基于天基网络拓扑感知与资源状态预测,构建多目标联合决策模型.需综合考虑终端-卫星的相对运动轨迹(轨迹动力学建模)、链路干扰矩阵(空频资源冲突图)、服务有效时长(覆盖窗口预测)和多星负载均衡度(负载迁移博弈)等参数,设计灵活的接入节点动态优化机制,如基于软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)的接纳控制算法^[88]、多星协同接入策略^[89]以及预测式接入决策^[90]等.

2)接入方式的自适应切换机制.考虑不同场景下的用户位置、移动速度、业务类型、业务优先级、网络负载、网络延迟等因素,构建业务类型-无线网络-网络状态的联合映射模型,设计灵活高效的接入方式选择和切换方案,如基于多模态DRL的随机接入策略优化框架^[91]、基于多目标协同优化的接入方式决策^[92]以及场景自适应的随机多址接入方式切换^[93]等.

3.2 极简随机多址接入

为了有效简化随机接入过程,3GPP提出了2步随机接入方案^[94].该方案在减少接入时延和信道干扰方面具有显著优势,能够实现快速随机接入,为卫星物联网通信效率的提升带来新契机.然而,卫星系统固有的大延迟、大多普勒频移等特性,给2步随机接入方案的实际应用带来了技术挑战.具体而言,需要解决2个关键问题:

1)弹性保护间隔配置.鉴于卫星系统的往返时间(RTT)远大于地面系统,调度器需要为保护间隔分配更多资源,以避免信号重叠和碰撞.需要建立多普勒-时延联合补偿模型,推导保护间隔(GI)的下限值,避免过小的GI选择造成的资源浪费或信号失真,同时需要在资源利用率和服务质量之间达成平衡.

2)高精度时序提前(TA)值的估计.卫星链路的大延迟会导致其反馈的随机接入响应消息中的TA值需要进行精确评估,综合考虑星地链路的传输时延和多普勒频移,以及用户的即时位置和移动速度等因素,实现星地融合的TA预测算法,确保随机接入的响应效率,避免接入超时或频繁请求资源分配等情况的发生.

3.3 MEC融合随机多址接入管理

卫星的信道资源(如频段、时隙数量)有限,这限制了接入协议可分配的资源数量.而且,卫星的信号处理能力受硬件设备性能的制约,复杂的信号处理算法可能难以在卫星上高效实现.此外,卫星对信号的处理速度有限,当数据传输速率过高时,可能导致信号处理延迟,进而影响数据传输质量.面向星载计算资源受限挑战,需要构建“云-边-端”协同的智能接入管理体系.

1)弹性网络功能编排.一是分布式MEC架构,在GEO卫星部署轻量化接入控制面,LEO卫星群承载分布式用户面功能(UPF),通过服务链动态编排实现计算任务卸载;二是联邦学习优化,构建跨卫星的联邦DDPG框架,各节点共享策略梯度而非原始共享数据,保证数据传输安全且模型收敛速度提升80%以上^[95].

2)预测性服务机制.构建包含轨道动力学模型、信道传播模型和业务流量模型的联合框架与AI模型;同时,通过学习用户移动、业务偏好等行为模式,设计随机接入链路中断和切换管理模型,提前生成波束指向与资源预留方案,从而提高整体网络的工作效率.

3)星地协同切片管理.6G网络需构建星地融合网络统一架构下按需部署网络和服务体系,设计融合天基网络、地面网络和MEC的多维资源联合切片接入管理机制,按需生成星地协同的接入网、传输网、算力网和核心网切片,实现动态切片编排和按需资源调度的能力^[96].

3.4 数据-模型联合驱动架构与场景验证

在卫星物联网领域,数据-模型联合驱动范式的研究正逐步从理论探索迈向工程实践.借助DL/RL

构建的具有自主进化能力的智能随机接入决策模型, 通过挖掘星历数据、信道状态等时空关联特征, 实现动态拓扑下的随机接入策略的实时优化. 构建机理模型约束与数据驱动优化的混合接入框架, 如在 DRL 的奖励函数中引入香农容量、不同优先级任务的时延限制等机理模型约束项, 确保生成策略的有效性与性能.

在典型场景验证方面, 现网测试正在覆盖多个典型场景, 如环境监测、农业监控以及海洋智能浮标等领域, 该类场景具有无人值守和终端能耗受限特点, 未来可在“云-边-端”协同的智能接入管理体系下, 通过引入轻量化的 DL/RL 算法与联邦学习分布式模型训练策略, 以兼顾终端的低功耗运行及数据隐私保护的目标^[97]. 此外, 在高速移动的车联网场景, 通过部署车载智能反射面 (IRS) 增强阴影区域覆盖, 协同卫星导航增强系统提升车辆定位的准确度, 设计数字孪生模型实时映射车辆轨迹与信道状态, 再由 DL/RL 算法动态调整波束与调制方式, 降低接入延迟, 保障链路可靠性^[98-99].

4 结 论

随着 5G NTN 技术的逐渐成熟, 6G 网络架构加速演化, 星地一体化融合发展路径愈发清晰. 为推进卫星物联网的大规模用户接入能力建设, 总结了卫星物联网多址接入技术的发展过程与主要分类, 然后从时隙与非时隙 2 个角度深入研究了代表性随机接入协议的技术路线与原理, 并针对卫星物联网下的新型融合型多址随机接入技术展开阐述. 最后对 6G 卫星物联网新架构下的随机接入技术的发展进行了总结和展望.

作者贡献声明: 丁飞负责设计论文整体思路、提出指导意见并修撰论文; 赵芝因负责文献综述、数据分析及论文撰写; 宋爱国、潘志文、张婷婷提出意见并修改论文.

参 考 文 献

- [1] Wang Chao, Zhang Peiying, Kumar N, et al. GCWCN: 6G-based global coverage wireless communication network architecture[J]. *IEEE Network*, 2022, 37(3): 218–223
- [2] People's Publishing House. Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 [M]. Beijing: People's Publishing House, 2021(in Chinese) (人民出版社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2021)
- [3] 3GPP (3rd Generation Partnership Project). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) / Enhanced Machine Type Communication (eMTC) Support for Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 17)[S]. Sophia Antipolis: 3GPP Organizational Partners, 2021
- [4] IMT-2030 (6G) Promotion Group. Recommendation on the framework and overall objectives for the development of IMT towards 2030 and beyond [R]. Beijing: IMT-2030 (6G) Promotion Group, 2022 (in Chinese) (IMT-2030(6G)推进组. IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书[R]. 北京: IMT-2030(6G)推进组, 2022)
- [5] IMT-2030 (6G) Promotion Group. White paper on the overall vision and potential key technologies of 6G [R]. Beijing: IMT-2030 (6G) Promotion Group, 2021(in Chinese) (IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景及潜在关键技术白皮书[R]. 北京: IMT-2030(6G)推进组, 2021)
- [6] Xie Haoran, Zhan Yafeng, Zeng Guangming, et al. LEO mega-constellations for 6G global coverage: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 164223–164244
- [7] Lunayach R, Knick E, Kowalski G. User capacity of a demand-assigned satellite communication system with a hybrid TD/FDMA up-link and a TDM down-link[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1983, 1(1): 110–117
- [8] Gandal N, Salant D, Waverman L. Standards in wireless telephone networks[J]. *Telecommunications Policy*, 2003, 27(5/6): 325–332
- [9] Taaghoul P, Evans B, Buracchini E, et al. Satellite UMTS/IMT2000 W-CDMA air interfaces[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(9): 116–126
- [10] Dalakas V, Mathiopoulos P T, Di Cecca F, et al. A comparative study between SC-FDMA and OFDMA schemes for satellite uplinks[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2012, 58(3): 370–378
- [11] Ko K T, Davis B. A space-division multiple-access protocol for spot-beam antenna and satellite-switched communication network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1983, 1(1): 126–132
- [12] Celandroni N, Secchi R. Suitability of DAMA and contention-based satellite access schemes for TCP traffic in mobile DVB-RCS[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 58(4): 1836–1845
- [13] Wu C S, Li V O K. Random access for a multibeam satellite with dynamic transponder switching[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, 37(6): 651–655
- [14] Su Jingrui, Ren Guangliang, Zhang Huining. Random interleaving multiplexing based random access in IoT-oriented satellite networks[C]//Proc of the 91st IEEE Vehicular Technology Conf (VTC2020). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–5

- [15] Roberts L G. ALOHA packet system with and without slots and capture[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1975, 5(2): 28–42
- [16] Abramson N. The ALOHA system: Another alternative for computer communications[C]//Proc of the 1970 Fall Joint Computer Conf. New York: ACM 1970: 281–285
- [17] Abramson N. The throughput of packet broadcasting channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1977, 25(1): 117–128
- [18] Sudhakar G N M, Georganas N D, Kavehrad M. Slotted Aloha and reservation Aloha protocols for very high-speed optical fiber local area networks using passive star topology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(10): 1411–1422
- [19] Choudhury G, Rappaport S. Diversity ALOHA-A random access scheme for satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, 31(3): 450–457
- [20] Casini E, De Gaudenzi R, Herrero O D R. Contention resolution diversity slotted ALOHA(CRDSA): An enhanced random-access scheme for satellite access packet networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(4): 1408–1419
- [21] De Gaudenzi R, del Rio Herrero O. Advances in random access protocols for satellite networks[C]//Proc of the 2009 Int Workshop on Satellite and Space Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 331–336
- [22] Liva G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 59(2): 477–487
- [23] Paolini E, Liva G, Chiani M. High throughput random access via codes on graphs: Coded slotted ALOHA[C]//Proc of the 2011 IEEE Int Conf on Communications (ICC). Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1–6
- [24] Paolini E, Liva G, Chiani M. Coded slotted ALOHA: A graph-based method for uncoordinated multiple access[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, 61(12): 6815–6832
- [25] Meloni A, Murrioni M, Kissling C, et al. Sliding window-based contention resolution diversity slotted ALOHA[C]//Proc of the 2012 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 3305–3310
- [26] Lee M, Lee J-K, Lee J-J, et al. R-CRDSA: Reservation-contention resolution diversity slotted ALOHA for satellite networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(10): 1576–1579
- [27] Lee Y, Lee J, Lim J, et al. MR-CRDSA: Multiple reservation-contention resolution diversity slotted ALOHA for battle-field communication[C] // Proc of the 2015 IEEE Military Communications Conf (MILCOM 2015). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 85–90
- [28] Bui H C, Zidane K, Lacan J, et al. A multi-replica decoding technique for contention resolution diversity slotted ALOHA[C]//Proc of the 82nd IEEE Vehicular Technology Conf (VTC2015). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1–5
- [29] Zidane K, Lacan J, Gineste M, et al. Estimation of timing offsets and phase shifts between packet replicas in MARSALA random access[C]//Proc of the 2016 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–7
- [30] Mengali A, De Gaudenzi R, Arapoglou P D. Enhancing the physical layer of contention resolution diversity slotted ALOHA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(10): 4295–4308
- [31] Liva G. Method for contention resolution in time-hopping or frequency-hopping: US, 12903246[P]. 2012-12-25
- [32] Bai Jialing, Ren Guangliang. Adaptive packet-length assisted random access scheme in LEO satellite network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 68250–68259
- [33] Sun Jingyun, Liu Rongke, Wang Yan, et al. Irregular repetition slotted ALOHA with priority (P-IRSA)[C]//Proc of the 83rd IEEE Vehicular Technology Conf (VTC 2016). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–5
- [34] Jia Dai, Yu Hanxiao, Sun Ce, et al. Feedback-aided irregular repetition slotted ALOHA (F-IRSA)[C]//Proc of the 9th Int Conf on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1–5
- [35] Jia Haoge, Ni Zuyao, Jiang Chunxiao, et al. Enhanced irregular repetition slotted aloha with degree distribution adjustment in satellite network[C]//Proc of the 2019 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1–6
- [36] Demirhan U, Duman T M. Energy-harvesting irregular repetition slotted ALOHA with unisized battery[C]//Proc of the 2018 IEEE Int Conf on Communications (ICC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1–6
- [37] Srivatsa C R, Murthy C R. Throughput analysis of PDMA IRSA under practical channel estimation[C]//Proc of the 20th IEEE Int Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1–5
- [38] Bui H C, Lacan J, Boucheret M L. An enhanced multiple random access schemes for satellite communications[C]//Proc of the 2012 Wireless Telecommunications Symp. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1–6
- [39] Sandgren E, I Amat A G, Brännström F. On frame asynchronous coded slotted ALOHA: Asymptotic, finite length, and delay analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 65(2): 691–704
- [40] Sun Zhuo, Xie Yixuan, Yuan Jinhong, et al. Coded slotted ALOHA for erasure channels: Design and throughput analysis[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(11): 4817–4830
- [41] Kissling C. On the stability of contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA)[C]//Proc of the 2011 IEEE Global Telecommunications Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1–6
- [42] Meloni A, Murrioni M. CRDSA, CRDSA++ and IRSA: Stability and performance evaluation[C]//Proc of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conf (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 220–225
- [43] Bacco M, De Cola T, Gotta A. TCP new Reno over DVB-RCS2 random access links: Performance analysis and throughput estimation[C]//Proc of the 2015 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1–6
- [44] Meloni A, Murrioni M. Random access in DVB-RCS2: Design and

- dynamic control for congestion avoidance[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2013, 60(1): 16–28
- [45] Lee M W, Lee J K, Noh H J, et al. Stability of reservation-contention resolution diversity slotted ALOHA for satellite networks[C]//Proc of the 2012 IEEE Military Communications Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1–6
- [46] Graell i Amat A, Liva G. Finite-length analysis of irregular repetition slotted ALOHA in the waterfall region[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(5): 886–889
- [47] Ivanov M, Brännström F, Graell i Amat A, et al. Error floor analysis of coded slotted ALOHA over packet erasure channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 19(3): 419–422
- [48] Stefanovic C, Paolini E, Liva G. Asymptotic performance of coded slotted ALOHA with multipacket reception[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 22(1): 105–108
- [49] Krondorf M, Goblirsch M, De Gaudenzi R, et al. Towards the implementation of advanced random access schemes for satellite IoT[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2020, 38(2): 177–199
- [50] Kissling C. Performance enhancements for asynchronous random-access protocols over satellite[C]//Proc of the 2011 IEEE Int Conf on Communications (ICC). Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1–6
- [51] Clazzer F, Kissling C, Marchese M. Enhancing contention resolution ALOHA using combining techniques[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 66(6): 2576–2587
- [52] De Gaudenzi R, del Rio Herrero O, Acar G, et al. Asynchronous contention resolution diversity ALOHA: Making CRDSA truly asynchronous[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(11): 6193–6206
- [53] Abramson N. Multiple access in wireless digital networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(9): 1360–1370
- [54] Herrero O D R, De Gaudenzi R. High efficiency satellite multiple access scheme for machine-to-machine communications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 2961–2989
- [55] Gallinaro G, Alagha N, De Gaudenzi R, et al. ME-SSA: An advanced random access for the satellite return channel[C]//Proc of the 2015 IEEE Int Conf on Communications (ICC). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 856–861
- [56] Kaul S, Yates R, Gruteser M. Real-time status: How often should one update?[C]//Proc of the 2012 IEEE INFOCOM. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2731–2735
- [57] Alsou N, Prigent S, Refai H. Analysis of priority R-ALOHA (PR-ALOHA) protocol[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2015, 15(4): 716–725
- [58] Chen He, Gu Yifan, Liew S C. Age-of-information dependent random access for massive IoT networks[C]//Proc of the 2020 IEEE Conf on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 930–935
- [59] Ahmetoglu M, Yavascan O, Uysal E. MiSTA: An age-optimized slotted ALOHA protocol[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(17): 15484–15496
- [60] Jiang Hui, Cui Qimei, Gu Yu, et al. Distributed layered grant-free non-orthogonal multiple access for massive MTC[C]//Proc of the 29th IEEE Annual Int Symp on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1–7
- [61] Bai Wei, Zhang Yujie, Kang Shaoli, et al. Novel multi-access technology for satellite IoT system[J]. *Integrated Information Network of Heaven and Earth*, 2023, 4(3): 31–39 (in Chinese) (白伟, 张钰婕, 康绍莉, 等. 卫星物联网系统的新型多址接入技术[J]. *天地一体化信息网络*, 2023, 4(3): 31–39)
- [62] Shao Xinye, Sun Zhili, Yang Mingchuan, et al. NOMA-based irregular repetition slotted ALOHA for satellite networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 624–627
- [63] Ramatryana I N A, Satrya G B, Shin S Y. Adaptive traffic load in IRSA-NOMA prioritizing emergency devices for 6G enabled massive IoT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(12): 2713–2717
- [64] Ko Y, Choi J. Reinforcement learning for NOMA-ALOHA under fading[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(10): 6861–6873
- [65] Xiao Nan, Wang Wei, Liang Jun, et al. Optimized multi-spectrum access strategy under sensing uncertainty for cognitive satellite communication network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 818–824 (in Chinese) (肖楠, 王伟, 梁俊, 等. 感知不确定下卫星认知无线网络多频谱接入优化策略[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(4): 818–824)
- [66] Ghosh P, Roy N, Das S K, et al. A pricing strategy for job allocation in mobile grids using a non-cooperative bargaining theory framework[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2005, 65(11): 1366–1383
- [67] Wang Dezhi, Wang Wei, Han Zhu, et al. Delay optimal random access with heterogeneous device capabilities in energy harvesting networks using mean field game[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(9): 5543–5557
- [68] Wang Dezhi, Wang Wei, Zhang Zhaoyang, et al. Delay-optimal random access in large-scale energy harvesting IoT networks based on mean field game[J]. *China Communications*, 2022, 19(4): 121–136
- [69] Badia L, Zanella A, Zorzi M. Game theoretic analysis of age of information for slotted ALOHA access with capture[C]//Proc of the 2022 IEEE Conf on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1–6
- [70] Khairy S, Balaprakash P, Lin Cai, et al. Data-driven random access optimization in multi-cell IoT networks using NOMA[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(7): 4938–4953
- [71] Cui Guangming, He Qiang, Xia Xiaoyu, et al. Demand response in NOMA-based mobile edge computing: A two-phase game-theoretical approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(3): 1449–1463
- [72] Kim W, Ahn Y, Shim B. Deep neural network-based active user

- detection for grant-free NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2143–2155
- [73] Liu Xiangnan, Zhang Haijun, Long Keping, et al. Deep reinforcement learning based on random access control in LEO satellite IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(16): 14818–14828
- [74] Han Xinyang, Li Zongwang, Xie Zhuochen. Two-step random access optimization for 5G-and-beyond LEO satellite communication system: A TD3-based MsgA channel allocation strategy[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(6): 1570–1574
- [75] Zhang Changwei, Sun Xinghua, Xia Wenchao, et al. Deep learning based double-contention random access for massive machine-type communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 22(3): 1794–1807
- [76] Balci A, Sokullu R. Fairness aware deep reinforcement learning for grant-free NOMA-IoT networks[J]. *Internet of Things*, 2024, 25: 101079
- [77] Song An, Zhao Haitao, Wang Shan, et al. Accurate analytical model for IEEE 802.11-based networks under nonsaturated condition[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(4): 760–768 (in Chinese)
(宋安, 赵海涛, 王杉, 等. 非饱和条件下 802.11 无线网络的精确分析模型[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(4): 760–768)
- [78] Atefi K, Yahya S, Rezaei A, et al. Traffic behavior of local area network based on M/M/1 queuing model using poisson and exponential distribution[C]//Proc of the 2016 IEEE Region 10 Symp (TENSYP). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 19–23
- [79] Cui Xiaosong, Pan Chengsheng, Dong Yunquan. A review of research on intelligent command and control network traffic theory[C]//Proc of the 10th China Conf on Command and Control. Berlin: Springer, 2022: 776–787
- [80] Shi Huafeng, Pan Cengsheng, Yang Li, et al. End-to-end latency evaluation of the Sat5G network based on stochastic network calculus[J]. *Computers, Material & Continua*, 2020, 65(2): 1335–1348
- [81] Yu Baozhu, Chi Xuefen, Liu Xuan. Martingale-based bandwidth abstraction and slice instantiation under the end-to-end latency-bounded reliability constraint[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 26(1): 217–221
- [82] Chen Yuang, Lu Hancheng, Qin Langtian, et al. When xURLLC meets NOMA: A stochastic network calculus perspective[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 62(6): 90–96
- [83] Kang M J, Lee J H, Chae S H. Channel estimation with DnCNN in massive MISO LEO satellite systems[C]//Proc of the 14th Int Conf on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 825–827
- [84] Zhang Qianfeng, An Kang, Yan Xiaojuan, et al. User pairing for delay-limited NOMA-based satellite networks with deep reinforcement learning[J]. *Sensors*, 2023, 23(16): 7062
- [85] Lee J H, Seo H, Park J, et al. Learning emergent random access protocol for LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 22(1): 257–269
- [86] Li Kai, Liu Yusha, Yang Kun. Delay sensitive link adaptation for LEO satellite-terrestrial networks[C]//Proc of the 2024 IEEE/CIC Int Conf on Communications in China (ICCC). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 144–149
- [87] IMT–2030 (6G) Promotion Group. Typical scenarios and key capabilities of 6G[R]. Beijing: IMT–2030 (6G) Promotion Group, 2022(in Chinese)
(IMT–2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力[R]. 北京: IMT–2030(6G)推进组, 2022)
- [88] Ji Xiang, Xu Changqiao, Zhang Hongke. Smart integrated cooperative transmission method for stereoscopic heterogeneous networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2024, 61(11): 2693–2705 (in Chinese)
(季翔, 许长桥, 张宏科. 面向立体化异构网络的智融协同传输方法[J]. *计算机研究与发展*, 2024, 61(11): 2693–2705)
- [89] Zhao Meihui, Ye Neng, OuYang Qiaolin, et al. Multi-satellite cooperative communication: Exploiting time asynchrony in non-orthogonal transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(5): 6868–6873
- [90] Lee J H, Park C, Park S, et al. Handover protocol learning for LEO satellite networks: Access delay and collision minimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 23(7): 7624–7637
- [91] Lee H, Lee S, Ko Y. Multichannel relay assisted NOMA-ALOHA with reinforcement learning based random access[C]//Proc of the 97th IEEE Vehicular Technology Conf (VTC2023). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1–5
- [92] Zhou Guorong, Zhao Liqiang, Zheng Gan, et al. Joint multi-objective optimization for radio access network slicing using multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(9): 11828–11843
- [93] Xu Xiaoxia, Liu Yuanwei, Mu Xidong, et al. Cluster-free NOMA communications toward next generation multiple access[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(4): 2184–2200
- [94] 3GPP. RP–182894: New Work Item: 2-Step RACH for NR[S]. Sorrento: ZTE Corporation, Sanechips, 2018
- [95] Parvizi P, Zou R, Bellinger C, et al. Reinforcement learning environment for wavefront sensorless adaptive optics in single-mode fiber coupled optical satellite communications downlinks[C]//Proc of the 2023 Photonics. Basel: MDPI, 2023: 1371
- [96] Tang Qinqin, Xie Renchao, Liu Xu, et al. MEC enabled satellite-terrestrial network: Architecture, key technique and challenge[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(4): 162–181(in Chinese)
(唐琴琴, 谢人超, 刘旭, 等. 融合 MEC 的星地协同网络: 架构、关键技术与挑战[J]. *通信学报*, 2020, 41(4): 162–181)
- [97] Shi Jianfeng, Chen Xinyang, Li Baolong. Research on task offloading and resource allocation algorithms in cloud-edge-end collaborative computing for the Internet of things[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(2): 458–469 (in Chinese)
(施建锋, 陈忻阳, 李宝龙. 面向物联网的云边缘端协同计算中任务卸

载与资源分配算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(2): 458–469)

- [98] Yao Yu, Zhao Bolin, Zhao Junhui, et al. Anti-jamming technique for IRS aided JRC system in mobile vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(9): 12550–12560
- [99] Liu Guangyi, Deng Juan, Zhu Yanhong, et al. 6G autonomous radio access network empowered by artificial intelligence and network digital twin[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2025, 26(2): 161–213



Ding Fei, born in 1981. PhD, professor. Senior member of CCF. His main research interests include intelligent perception, unmanned swarm systems, and hybrid cyber-physical systems.

丁 飞, 1981 年生. 博士, 教授. CCF 高级会员. 主要研究方向为智能感知、无人集群系统、混合信息物理系统.



Zhao Zhiyin, born in 2000. Master. Her main research interests include space-terrestrial integrated networks and intelligent wireless access technologies.

赵芝茵, 2000 年生. 硕士. 主要研究方向为星地融合网络、智能无线接入技术.



Song Aiguo, born in 1968. PhD, professor. His main research interests include space detection, intelligent perception, and teleoperated robotics and control.

宋爱国, 1968 年生. 博士, 教授. 主要研究方向为空间探测、智能感知、遥操作机器人与控制.



Pan Zhiwen, born in 1970. PhD, professor. His main research interests include broadband wireless networks, wireless transmission technologies, and intelligent wireless communications.

潘志文, 1970 年生. 博士, 教授. 主要研究方向为宽带无线网络、无线传输技术、智能无线通信.



Zhang Tingting, born in 1978. PhD, professor. Her main research interests include intelligent command and control of unmanned systems, intelligent decision-making, and information network architectures.

张婷婷, 1978 年生. 博士, 教授. 主要研究方向为无人系统智能指挥控制、智能决策、信息网络体系.