

卫星互联网抗干扰策略研究展望

韩晨¹, 刘爱军², 安康¹

(1. 国防科技大学第六十三研究所, 江苏 南京 210007;

2. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 卫星互联网作为国家信息化建设的重要基础设施, 对维护国家安全具有重要意义。在干扰环境中, 卫星互联网仍需保证其数据传输的有效性和可靠性。智能化新型干扰的威胁以及经典链路级抗干扰手段的局限性催生了智能化、网络化抗干扰的新需求。针对卫星互联网的结构特点和现代通信干扰技术的发展趋势, 探析智能化、网络化抗干扰的基本架构。智能化抗干扰基于“感知—学习—预测—决策—反馈”的逻辑闭环, 进行主动抗干扰决策, 以实现自配置和自优化。网络化抗干扰通过各节点之间的协作通信, 以拓扑控制重建链路、邻近节点资源重配置、业务流量负载均衡等方式提高网络化抗干扰水平, 为构建跨层联合、多域结合、自主智能的抗干扰策略体系提供一定技术支撑。

关键词: 卫星互联网; 智能化抗干扰; 网络化抗干扰

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022007

Research Prospect of Anti-Jamming Strategy for the Satellite Internet

HAN Chen¹, LIU Aijun², AN Kang¹

1. Sixty-Third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China

2. College of Communications Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing, 210007, China

Abstract: As an important infrastructure of the national information system, the satellite internet is of great significance to the national security. Thus, it needs to ensure the validity and reliability of the data transmission in the hostile jamming environment. The threat of smart jamming and the limitation of classical link-layer anti-jamming methods give rise to the new demand of intelligent and networked anti-jamming solutions. In view of the structural characteristics of the satellite internet and the development trend of modern communication jamming technologies, this paper analyzed the basic architecture of intelligent and networked anti-jamming. Based on the closed-loop strategic of sense-learn-prediction-decision-feedback, intelligent and active anti-jamming decision was made to realized self-configuration and self-optimization. Based on the cooperative communication between nodes, networked anti-jamming ability was improved by the means of topology control and reconstruction, adjacent resources reallocation, and traffic load balancing. It provided certain theoretical support for the construction of anti-jamming strategy system to achieved the cross-layer optimization, multi-domain combination, and adaptive intelligence.

Keywords: satellite internet, intelligent anti-jamming, networked anti-jamming

0 引言

2020年, 中国联通的《空天地一体化通信网络白皮书》指出, 未来的6G移动通信以智联万物为主要特点^[1-2]。6G网络将突破地形、地表限制, 构建跨地域、跨空域、

跨海域的卫星互联网, 实现真正意义上的泛在连接、无缝覆盖。卫星互联网是赋能天地一体化信息网络无缝连接、全球覆盖的核心网络^[3]。作为国家信息化建设的重要基础设施, 卫星互联网对维护国家安全具有重要意义, 在干扰

收稿日期: 2022-01-07; **修回日期:** 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61901502); 全国博士后创新人才支持计划 (No. BX20200101)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No. 61901502), The National Postdoctoral Innovative Talent Support Program(No. BX20200101)

威胁下，仍需保证其数据传输的有效性和可靠性。

1 卫星互联网的抗干扰需求

卫星互联网在多个领域发挥着重要作用，能够支持现代信息化作战，通过集成并共享战场态势，为多兵种联合攻防提供信息支持，对拓展国家利益、维护国家安全具有重要意义。现代化战争形态的不断衍化和军队现代化建设的不断进步对卫星互联网的发展提出了新的要求和挑战。面对复杂多变的通信对抗环境，卫星互联网需要加强干扰威胁下信息传输的安全性和可靠性。同时，其复杂的网络结构、受限的网络资源、多样的业务类型等特点进一步加剧了卫星互联网抗干扰研究的复杂度和紧迫性。

复杂的网络结构：卫星互联网的节点类型众多，不同节点在功能属性、空间位置、配备资源、传输能力等方面均有显著差异，从而导致了多节点、多层级、高动态的复杂网络结构。

受限的网络资源：卫星互联网中大部分节点的计算能力和存储能力有限。网络中各节点的通信资源（功率、频率等）以及组网资源（邻近节点集合等）差异明显。受制于有限的本地资源，各节点应尽可能与邻近节点实施协作通信，以提高通信性能。

多样化业务类型与分布：不同网络、不同地域、不同用户的业务类型各不相同，且各种业务类型对服务质量与传输效率的要求亦不尽相同，因而卫星互联网中不同节点的本地资源与传输任务的适配程度存在明显差异。从网络层面来看，部分区域、部分节点的业务负载较重，但资源十分短缺，同样存在业务负载较轻而资源相对充足的其他区域（或节点）。通信资源与传输任务的错配是制约卫星互联网通信效率的重要因素。

复杂的网络结构意味着在面临干扰威胁时，卫星互联网可能遭遇多层、多域、多环节的干扰攻击，对网络本身的鲁棒性和自组织、自愈合特性提出了较高要求。受限的网络资源意味着面临干扰威胁时，各节点的链路层抗干扰技术，诸如扩频跳频、功率对抗等抗干扰手段的效果有限。当面临强干扰攻击时，各节点本地的通信资源可能不足以进行有效的链路层抗干扰防御。多样化的业务类型与分布意味着干扰机可以有针对性地施加干扰攻击。例如可以重点针对高流量节点和区域施加致毁干扰，或针对时延敏感的业务施加拥塞干扰，从而实现毁点破链、断链破面的灵活、高效、精准干扰，对卫星互联网的可靠传输能力造成严重威胁。

抗干扰能力是维护卫星互联网的互联互通功能，实现安全、可靠、高效运行的重要性能指标。现有的通信抗干扰相关的技术研究主要集中在扩频跳频技术、自适应调

零天线等物理层、链路层的抗干扰技术体制研究。此类研究针对传统干扰具有较好的抗干扰性能^[4]。但是随着通信干扰技术的不断进步，干扰样式逐渐向高效化、综合化、智能化方向发展。因此，为适应现代通信的发展需求，应对智能化干扰的严重威胁，完善和拓展抗干扰策略体系，抗干扰技术应具备智能化、网络化的抗干扰能力，以实现跨层联合、多域结合、自主智能的抗干扰防御。

2 智能化、网络化抗干扰架构

经典的抗干扰技术包括以扩频和跳频为代表的频率域抗干扰技术，以多波束天线和自适应调零天线为代表的空间域抗干扰技术，以跳时通信和瞬时通信为代表的时间域抗干扰技术等。此类经典的物理层、链路层的抗干扰技术对于干扰策略相对固定的常规干扰具有较好的抗干扰效果。但是随着通信干扰技术的不断进步，高效化、智能化的新型干扰对卫星互联网的可靠传输能力提出新的挑战。因此通信抗干扰的研究重点应转向智能化、体系化的抗干扰策略研究，通过对干扰行为和干扰策略的分析和学习，综合而灵活地运用各种抗干扰技术，构建跨层联合、多域结合、自主智能的抗干扰策略体系，以应对智能化的新型干扰。

2.1 智能化抗干扰

传统的抗干扰决策机制对于当前频谱态势的把握主要基于人为判断，且抗干扰动作的实施时刻和方式具有一定的主观性。此类抗干扰决策方法对历史数据的利用较为粗浅，通常基于直观的因果关系进行抗干扰决策。智能化抗干扰可以通过数据分析和环境学习，从基于直观因果关系决策转向基于相关关系决策，构建“感知—学习—预测—决策—反馈”的逻辑闭环，实现对历史数据的深入挖掘和对当前频谱态势的深刻把握，从而进行主动抗干扰决策，实现自配置和自优化。

智能抗干扰技术原理如图1所示，通信方采集电磁频谱数据，并进行数据存储、数据标记等处理，然后将得到的受扰环境特征与知识库进行匹配推理。如果知识库中已经存在此类干扰，则直接输出对应的抗干扰策略；如果面临未知的干扰场景，则分析干扰行为的空、时、功、频等多维特征，进行学习推理。此时，知识库中的抗干扰知识可以通过迁移学习的方式，辅助当前的学习过程，加速抗干扰策略的收敛^[5]。通过案例匹配或学习推理得到抗干扰策略后，结合之前的历史数据，分析敌方的干扰策略，并预判干扰行为；然后综合考虑当前可用的抗干扰资源，进行最终的抗干扰决策，输出抗干扰动作；最后，根据通信效果反馈，优化并调整抗干扰策

略,实施高效、精准的抗干扰防御。

对于双方都采取智能策略的通信对抗而言,智能化的实现源于智能算法和计算能力的深度融合。脱离了硬件设施和计算能力,智能对抗将退化为战术思想的碰撞,而差距悬殊的硬件条件会导致通信对抗中绝对优势方的出现。此时基于双方理性的通信对抗研究难以取得有意义的研究结果。在双方能力相差不甚悬殊的条件下,研究智能化的对抗策略,将干扰机与通信用户之间的策略对抗建模为对抗博弈,可在有限约束下实现动态均衡,得到稳定的对抗策略。

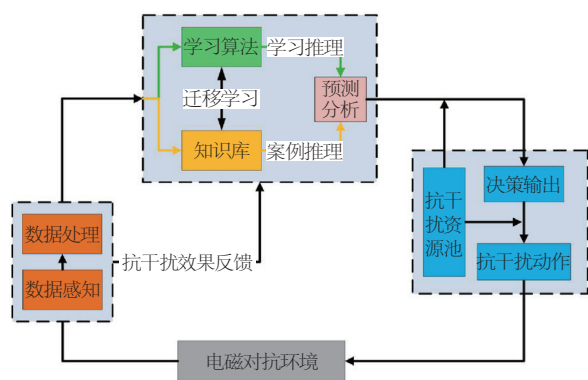


图1 智能抗干扰技术原理

智能化抗干扰决策的实现得益于智能算法和理论的应用和深化。博弈理论和强化学习技术已经广泛应用于通信领域,为抗干扰防御提供新的思路和手段^[6-7]。博弈理论主要研究决策主体之间的相互作用及策略均衡问题,可用于建模通信对抗双方的动态交互^[8]。参考文献[9]构建分层的斯坦伯格博弈以分析干扰机和通信用户的对抗交互。在参考文献[10]中,斯坦伯格博弈用于分析合法用户在智能干扰威胁下的对抗策略。参考文献[11]应用斯坦伯格博弈研究了干扰机与通信用户之间的抗干扰功率控制问题。参考文献[12]基于势能博弈模型和随机学习理论,提出一种抗干扰信道选择算法,用于降低内部互扰和外部恶意干扰的影响。参考文献[13]提出一种基于斯坦伯格博弈的信道和功率联合分配算法,通过牺牲部分用户以欺骗干扰机,从而提高其他用户的传输性能。参考文献[14]基于最佳响应算法和“讨价还价”模型提出一种多用户协作抗干扰算法。参考文献[15]提出一种激励进化博弈用于建模节点间的合作,并抑制自私节点和恶意节点。

强化学习技术可以动态适应未知的干扰环境,并进行自主的抗干扰决策。参考文献[16]利用深度强化学习技术,研究干扰威胁下的信道选择问题。参考文献[17]提出一种基于强化学习和马尔科夫博弈的频率域智能抗干扰

方法,解决扫频干扰下的多用户协同抗干扰问题。参考文献[18]基于多臂赌博机模型和UCB (Upper Confidence Bound) 算法,提出一种针对航空网络的频率域抗干扰算法以应对干扰威胁。参考文献[19]提出一种基于改进Q学习的无人机网络抗干扰算法,解决频率选择、运动方向及天线角度的联合优化问题。参考文献[20]基于斯坦伯格博弈和深度强化学习技术研究了面向卫星互联网的抗干扰智能路由问题。参考文献[9, 21]利用强化学习和斯坦伯格博弈研究了路由选择、信道分配、功率控制的联合抗干扰问题。

现有文献中关于智能抗干扰的研究主要集中于利用博弈理论、机器学习等方法解决干扰威胁下的功率控制、信道选择等问题。目前的研究方向主要局限于物理层、链路层的抗干扰技术研究,而针对网络层、传输层等更高层的智能抗干扰研究工作相对较少。

2.2 网络化抗干扰

智能化干扰的威胁催生智能抗干扰的迫切需求,而目前关于智能抗干扰的研究主要集中于物理层、链路层,以频率域抗干扰和功率域抗干扰。链路级的抗干扰技术受限于通信资源,并且更关注用户个体或者单节点的抗干扰防御,难以应对大范围覆盖的针对网络结构的干扰攻击。现有文献中有大量针对物理层、链路层的基于功率域、频率域的抗干扰工作,但是网络化的抗干扰策略研究还是一个开放的研究课题。卫星互联网复杂动态的拓扑结构极易受到恶意干扰威胁。在链路层抗干扰手段难以取得明显效果时,网络化的抗干扰技术是维护卫星互联网鲁棒性和可靠性的重要手段,也是构建跨层联合、多域结合、自主智能的抗干扰策略体系的重要一环。

2.2.1 网络化抗干扰需求

卫星互联网主要由不同轨道高度的卫星星座组成。由于卫星暴露空中,且具有固定的运行轨道和可测的运动规律,因而卫星通信容易受到恶意干扰或致毁攻击^[22-23]。因此各国致力于提高卫星通信系统的抗干扰能力。例如,美军先后研发了军事卫星通信系统(MILSTAR)和先进极高频卫星通信系统(AEHF),负责为战时提供保密、抗干扰的信息保障^[24]。美军的MILSTAR卫星系统,是世界上首个采用数字处理和跳频技术的卫星系统,具有强抗干扰性能。MILSTAR采用星上处理技术,可有效去除上行链路引入的干扰信号。MILSTAR II采用调零点波束天线,可针对上行链路干扰实现自动调零,进一步增强了抗干扰能力。AEHF卫星系统采用扩频、跳频、星间链路、星上处理、相控阵天线等多种技术,具备强抗干扰、低检测概率、低截获概率等特点,有效增强了通信的可靠

性和有效性^[25]。现有的卫星通信抗干扰研究主要集中于扩频跳频技术, 调零天线等物理层、链路层的抗干扰技术体制研究。但是随着通信干扰技术的不断进步, 干扰机的干扰意图和干扰策略会根据对方通信行为的变化而动态调整, 这对卫星通信系统的可靠传输能力带来严峻挑战。例如, 参考文献[9]中的智能化干扰机可以通过自主调整干扰功率和干扰频率以最大化干扰效果。因此卫星通信抗干扰研究应通过对干扰行为和干扰策略的分析和学习, 综合而灵活地运用各种抗干扰技术, 采取智能化的抗干扰策略以应对智能化的干扰威胁。

除了链路层的抗干扰手段, 面向卫星互联网的抗干扰还可以着眼于网络资源的高效灵活调度^[26], 通过邻近卫星之间的资源协作提高整个卫星网络的抗干扰效率。此外, 卫星互联网物理拓扑的规律性增强网络业务和流量数据的可预测性, 因而基于预测的资源分配有助于增强卫星互联网的抗干扰性能。同时, 由于卫星通信技术的飞速发展, 卫星之间除了固定的传输链路, 同时存在机会式的星间链路, 其增强了卫星网络的鲁棒性和灵活性。结合卫星业务流量的可预测性以及星间链路的灵活性, 卫星互联网可以实现智能灵活的高效路由, 以应对面向卫星通信网络的智能化干扰攻击。

卫星通信系统具有广覆盖、大容量、便于广播的特点, 因此卫星网络, 尤其是时延较小的LEO卫星网络, 可以为物联网提供巨大流量的广域传输支持^[27]。卫星赋能的物联网系统的无缝覆盖、大容量和海量连接等优势, 使其在海洋监测和应急救援等多种场景中发挥重要作用^[28]。

美军的“网络中心战”项目把太空飞行器、高空飞机、无人机群、地面车辆、航母舰船及其他作战装备和后勤物资都置于互联互通的军事物联网之中, 实现传感器网络、信息网络、指挥网络的高度融合。这对信息平台提出更高的传输需求。对于军事物联网, 大流量传输会面临恶意干扰的威胁, 尤其是人工智能技术赋能的智能干扰可以通过空-时-频数据分析, 学习军事物联网的流量规律, 有针对性地对大流量的关键节点施加干扰, 从而降低军事物联网的传输性能^[29]。海量装备的大规模互联, 极大增加军事物联网的复杂性, 从而造成通信方的抗干扰决策空间激增, 对传统抗干扰方式提出更大挑战^[30]。

2.2.2 网络化抗干扰框架

对于通信网络而言, 通信任务的完成可视为3个网络结构共同作用的结果, 即业务网结构、资源网结构、链路网结构。

业务网结构用于描述网络中各节点的业务负载程度。不同节点承载的通信业务的负载程度有较大差异, 且该差异与各节点所处的空间位置、地理因素、社会经

济发展程度息息相关。负载较重的节点承载更多的通信任务, 其对资源的需求也更为迫切; 负载较轻的节点则有更多的闲置资源。网络负载的不均衡是造成资源利用率低下的重要原因。

资源网结构表征各节点拥有的能源功率、可用频率、计算能力、存储能力等通信资源的配备情况。各节点当前可用的通信资源与当前的业务负载密切相关。业务需求和传输能力之间的差异将导致资源错配。此外, 干扰环境中的有效通信资源, 不仅包括完成传输任务所需要的传输资源, 还包括抵御干扰攻击所耗费的抗干扰资源。因而, 部分节点受扰较轻、资源充裕, 但业务量较小, 故有较多的冗余资源。同时, 部分节点受干扰严重或负载拥塞, 导致本地资源不足以完成传输任务而面临资源短缺问题。

链路网结构取决于该网络实际的物理链路的构建, 受限于各节点的通信资源、所处无线环境以及受干扰程度。通信资源充足、信道状况良好的节点可以与更多的邻近节点建立有效链路, 因而拥有更大的可通信范围和一跳可达的邻居节点集合, 从而形成更为稳健的网络拓扑结构。但其同时也将成为中心式的关键节点, 更容易受到干扰攻击。干扰方施加干扰, 以达到毁点破链、断链破面的干扰效果, 对链路网结构造成严重破坏。因此, 链路网是干扰方直接针对的攻击对象, 也是干扰效果的直接承受者。

网络化抗干扰框架如图2所示, 业务网、资源网和链路网是相互依存而又不完全重合的3张网络, 其共同组成通信网络的实际有效拓扑。业务网的拓扑结构取决于该节点承载的业务负载, 体现该网络内含的通信行为规律。资源网的拓扑改变受限于物理链路, 同时链路网的拓扑结构受到各节点资源配备的制约。通信资源不足的节点之间不能建立有效链路。同时, 无法建立有效链路的节点间的资源不能实现协作调度。因此, 资源网的资源分布应根据当前网络的实际链路结构, 动态地适当前网络的业务分布和传输任务。

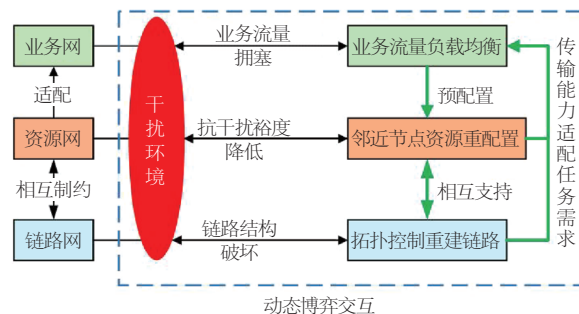


图2 网络化抗干扰框架

干扰的存在会破坏网络的链接结构,降低各节点的有效通信资源,甚至导致各节点的业务负载拥塞。当各节点本地的通信资源不足以实现有效的链路层抗干扰防御时,网络化的抗干扰策略可以通过节点之间的协作通信提升传输性能,并增强网络弹性,提高动态适应性和抗干扰能力。

网络化抗干扰即通过各节点之间的协作通信,以业务流量负载均衡、邻近节点资源重配置、拓扑控制重建链路等方式实现干扰威胁下的规律隐藏(隐)、电磁对抗(抗)、干扰躲避(避)等抗干扰目的。各节点深入挖掘本地通信规律,充分利用已知先验信息,通过对业务流量的预测分析,实现负载均衡和资源预配置,从而隐藏关键节点和热点区域。邻近节点之间通过资源重配置提高资源利用率,缓解网络的资源错配状况。同时,各节点可以通过动态灵活的子网结构,重建链路控制网络拓扑。将资源重配置与链路重建相结合,实现传输能力与抗干扰需求以及传输任务的适配,以提高干扰威胁下卫星互联网的信息传输的有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] 中国联通. 空天地一体化通信网络白皮书[Z]. 2020.
China Unicom. White paper on air-space-ground integrated communication network[Z]. 2020.
- [2] 张更新, 丁晓进, 曲至诚. 天地一体化物联网体系架构及干扰分析研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 22-33.
ZHANG G X, DING X J, QU Z C. Research on space-based integrated Internet of Things architecture and interference analysis[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 22-33.
- [3] 张晓凯, 郭道省, 张邦宁. 空天地一体化网络研究现状与新技术的应用展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 19-26.
ZHANG X K, GUO D X, ZHANG B N. Research status of space-air-ground integrated network and application prospects of new technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 19-26.
- [4] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
YAO F Q. Communication anti-jamming engineering and practice[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [5] HAN C, NIU Y. Multi-regional anti-jamming communication scheme based on transfer learning and Q learning[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2019, 13(7): 3333-3350.
- [6] HASSAN M M, ABDULLAH-AL-WADUD M, ALMOGREN A, et al. Energy-aware resource and revenue management in federated cloud: a game-theoretic approach[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(2): 951-961.
- [7] GAO N, QIN Z J, JING X J, et al. Anti-intelligent UAV jamming strategy via deep Q-networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 569-581.
- [8] TANG F X, FADLULLAH Z M, KATO N, et al. AC-POCA: anti coordination game based partially overlapping channels assignment in combined UAV and D2D-based networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1672-1683.
- [9] HAN C, NIU Y T. Cross-layer anti-jamming scheme: a hierarchical learning approach[J]. IEEE Access, 2018, 6: 34874-34883.
- [10] YANG H J, SHI M, XIA Y Q, et al. Security research on wireless networked control systems subject to jamming attacks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(6): 2022-2031.
- [11] FENG Z B, REN G C, CHEN J, et al. Power control in relay-assisted anti-jamming systems: a Bayesian three-layer stackelberg game approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 14623-14636.
- [12] JIA L L, XU Y H, SUN Y M, et al. A game-theoretic learning approach for anti-jamming dynamic spectrum access in dense wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1646-1656.
- [13] ZHANG Y L, XU Y H, XU Y T, et al. A multi-leader one-follower stackelberg game approach for cooperative anti-jamming: no pains, no gains[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(8): 1680-1683.
- [14] ZHANG L Y, GUAN Z Y, MELODIA T. United against the enemy: anti-jamming based on cross-layer cooperation in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5733-5747.
- [15] WANG E K, CHEN C M, YIU S M, et al. Incentive evolutionary game model for opportunistic social networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 102: 14-29.
- [16] LIU X, XU Y H, JIA L L, et al. Anti-jamming communications using spectrum waterfall: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(5): 998-1001.
- [17] YAO F Q, JIA L L. A collaborative multi-agent reinforcement learning anti-jamming algorithm in wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(4): 1024-1027.
- [18] LI H T, LUO J W, LIU C J. Selfish bandit-based cognitive anti-jamming strategy for aeronautic swarm network in presence of multiple jammer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 30234-30243.
- [19] PENG J L, ZHANG Z X, WU Q H, et al. Anti-jamming communications in UAV swarms: a reinforcement learning approach[J]. IEEE Access, 2019, 7: 180532-180543.
- [20] HAN C, HUO L Y, TONG X H, et al. Spatial anti-jamming scheme for Internet of satellites based on the deep reinforcement

- learning and stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(5): 5331-5342.
- [21] 韩晨, 牛英滔. 基于分层Q学习的联合抗干扰算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(5): 279-284.
- HAN C, NIU Y T. Joint anti-jamming algorithm based on hierarchical Q learning[J]. Computer Engineering, 2019, 45(5): 279-284.
- [22] ZIEBOLD R, MEDINA D, ROMANOVAS M, et al. Performance characterization of GNSS/IMU/DVL integration under real maritime jamming conditions[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(9): 2954.
- [23] TOMÁŠ M, PAVEL P, PAVEL K. Study of the GNSS jamming in real environment[J]. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2019, 65(1): 65-70.
- [24] 王硕, 赵梦. 美国军事卫星通信系统应用机制研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(1): 110-115.
- WANG S, ZHAO M. Study on usage mechanism of USA military satellite communications system[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(1): 110-115.
- [25] 袁飞, 文志信, 王松松. 美军EHF卫星通信系统[J]. 国防科技, 2010, 31(6): 22-26.
- YUAN F, WEN Z X, WANG S S. EHF satellite communication system of the US army[J]. National Defense Science & Technology, 2010, 31(6): 22-26.
- [26] 张美蓉, 镐梦婷, 王闯, 等. 高低轨卫星异构网络资源管控策略与技术研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(4): 67-74.
- ZHANG M R, HAO M T, WANG C, et al. Research on strategies and technologies for resource management and control of heterogeneous network of high and low orbit satellites[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(4): 67-74.
- [27] DE SANCTIS M, CIANCA E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1): 113-123.
- [28] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 23(1): 70-109.
- [29] TANG F X, FADLULLAH Z M, MAO B M, et al. An intelligent traffic load prediction-based adaptive channel assignment algorithm in SDN-IoT: a deep learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 5141-5154.
- [30] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.

[作者简介]



韩晨 (1993-), 男, 博士, 国防科技大学第六十三研究所工程师, 主要研究方向为天地一体化信息网络、通信抗干扰。



刘爱军 (1970-), 男, 博士, 陆军工程大学通信工程学院教授, 主要研究方向为卫星通信、信号处理。



安康 (1989-), 男, 博士, 国防科技大学第六十三研究所高级工程师, 主要研究方向为天地一体化信息网络、智能超表面、通信抗干扰。