

# 2026 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

## 一、项目名称

复杂电磁环境下卫星多向高效传输关键技术及应用

## 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省知识产权局

提名意见：

该项目面向我国在轨卫星通信在复杂电磁对抗环境下面临的重大技术挑战，系统突破了空间动态频谱感知、星地资源调度与波束控制、星间组网路由传输与跨层协同等关键技术难题，形成了具有完全自主知识产权的卫星通信感通一体化技术体系。项目技术难度大、创新性强，在轻量化精细频谱感知、跳波束干扰抑制捷变传输、多目标数据驱动路由优化等方面取得了原创突破，整体技术达到国际先进水平，其中高精度频谱感知方法与跳波束干扰抑制捷变传输方法处于国际领先。项目获授权发明专利数十项，发表高水平学术论著多部，成果已成功应用于中国星网、国家消防救援局等国家重大工程，产生了显著的经济社会效益和军事效益，推广应用前景广阔。

该项目成果材料齐全规范，知识产权归属清晰，人员排序无争议。符合陕西省技术发明奖提名条件。特提名为陕西省技术发明奖二等奖。

### 三、项目简介

卫星通信作为航天强国、数字中国两大国家战略的交叉枢纽，承担着构建天地一体化网络的关键使命。然而，全球频谱资源争夺白热化，面对当前空天电磁频谱对抗日益激烈和低轨星座大规模部署的战略环境，我国在轨卫星通信系统正面临严峻挑战：复杂动态的电磁环境与未知干扰严重威胁通信链路的稳定性，而星间链路增多与拓扑动态变化又导致频谱资源竞争加剧、网络负载失衡，制约系统服务质量的均衡性与覆盖效能。因此，为构建具备“高可靠、大容量、全覆盖”特性的新一代系统，学术界和工业界已在信号智能识别、自适应抗干扰及多路径路由等领域取得一系列突破，但在构建动态抗毁的卫星通信防御体系中仍存在以下显著技术短板：1. 卫星复杂电磁干扰环境导致传输信号识别“辨不明”；2. 传统波束与资源调度策略固定导致通信资源利用“效率低”；3. 网络流量分布不均引发局部星间传输“易拥堵”；4. 卫星通信感知、决策与传输环节“低融合”，严重限制卫星通信系统整体效能的提升。

围绕上述卫星通信问题，项目团队在国家自然科学基金、部委预研/研发、装备研制任务等 10 项科研项目支持下，历经 8 年从理论到应用全链条攻关，深入开展复杂电磁环境下卫星多向高效传输关键技术研究，突破了频谱态势地图高精度重构、通信资源高效智能博弈、波束捷变与多址接入深度协同、抗毁路由规划等核心技术。项目成果为构建“高可靠、大容量、强安全”的新一代卫星通信系统提供了坚实基础。项目主要技术发明和创新如下：

**1. 发明了“精细感知、由点及面”的复杂电磁态势智能感知与生成方法。**核心创新：①构建了基于深度学习与联合特征提取的轻量化精细频谱感知架构，实现了对频谱多尺度特征的高效捕获与融合，在信噪比大于 5dB 时，对信号指纹的精细感知识别精度高达 98.13%，将重构误差(RMSE)从 12.95dB 显著降低至 2.83dB，实现了对复杂电磁信号的高稳定精准识别与重构。②创建了联合频谱态势生成张量补全算法与智能预测模型，并结合对抗生成网络实现全域空-频态势的高精度生成，使生成态势的 RMSE 从 15.3dB 降至 8.4dB；进一步提出了态势感知驱动的智能扩频通信方法，实现了**从固定频点对抗到动态频谱规避**的根本性转变。

**2. 发明了“动态适配、快速求解”的高效率资源分配与干扰抑制方法。**核心创新：①系统设计了从单星到双星协同的系列智能优化算法，并提出了基于功率分配竞争的认知跳波束机制与自适应波束功率分配算法，使卫星系统服务质量提升 40%；并创新构建了复数多目标简化模型，在计算时间减少 57%的同时，服务质量提升不少于 13.6%，实现了优化效率与性能的协同提升。②**首次将速率分割多址接入与鲁棒波束赋形相结合**，实现了波束捷变与多址接入的深度协同及资源动态博弈，其将安全能量效率提升至传统方案的 2.15 倍，并将保密中断概率降低了 3 个数量级；进一步，通过波束、功率、带宽等多维资源的自适应博弈与交换，使方案在动态星地场景下的适用性提升 25%。

**3. 发明了“高效寻优、韧性增强”的多目标数据驱动星间路由传输方法。**核心创新：①创新提出**融合卫星系统吞吐量、延迟、负载均衡性等多目标正则化的卫**

**星路由策略**，并将虚拟拓扑策略与高维解耦思想结合，提出改进的随机爬山策略进行快速路由寻优，最终在提升网络吞吐量的同时，将信关站负载均衡系数显著提高了约 56.23%，有效缓解了网络局部拥塞。②在韧性增强方面，提出了基于数据驱动与局部泛洪检测的故障感知与抗毁规划技术，将故障检测开销降低约 96.82%，大幅增强了卫星网络在故障环境下的持续服务能力。

**4. 构建了融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统。**核心创新：系统深度集成了高精度频谱态势生成、动态资源调度与抗干扰捷变传输能力，提出了基于正则映射与数据驱动的抗毁路径规划新方法，并**成功研制感通一体化处理平台**，首次实现了从“电磁态势精准感知”到“传输资源动态调控”的智能协同。经实际天基平台验证，**该系统在 1 分钟周期内实现了四大突破**：2GHz 宽带电磁态势感知、10ns 级波束捷变、10Hz 级精细频探及 bps-kbps 级宽动态自适应传输，从根本上提升了复杂电磁环境下通信的抗干扰性、资源效率与业务保障能力，标志着我国在智能卫星通信系统研制上取得重要进展。

**【知识产权】**项目形成了完整的自主知识产权体系，相关理论创新成果已获发明专利 36 项，发表高水平论文 39 篇，出版专著 2 部。其中，多项发明专利直接支撑复杂电磁态势生成、智能扩频通信、自适应波束功率分配、双层卫星协同传输、有益干扰资源调度以及扩频信号速率自适应捕获等核心技术，技术成果具有良好的自主可控性和工程转化基础。项目取得了一系列具有代表性的技术指标：在复杂电磁环境下，精细频谱感知识别精度达到 98% 以上，频谱态势重构误差显著降低；基于 RSMA 与鲁棒波束赋形的传输机制显著提升安全能量效率并降低保密中断概率；工程系统实现了 GHz 级宽带电磁环境感知、纳秒级波束捷变、Hz 级精细频率探测以及宽动态范围自适应速率传输，具备复杂环境下快速感知、智能决策和可靠传输能力。

**【成果应用】**本成果技术已在国家重大航天工程、重点型号装备及关键信息基础设施中得到深入应用，创造了显著的综合效益。成果覆盖高/低轨卫星、地面业务系统等多类卫星通信场景，**累计创造直接经济效益 10200 万元，并带动新增产值近 2 亿元。****在战略安全方面**，技术应用于某高轨卫星系统研制中，显著提升干扰环境下的精准目标定位，其频谱地图生成精度可达 98%，定位误差小于 0.01；**在公共应急方面**，技术支撑国家消防救援卫星专网、海上宽带通信等系统建设，使上述卫星专网系统频谱利用率提升 35%，有效增强应急通信保障能力；**在民生服务方面**，技术成功应用于某高通量卫星、某低轨卫星系统，实现频谱态势高精度感知与高可靠数据传输，并保障卫星组网服务年可用性稳定在 97.2% 以上，有力提升了公众通信服务质量与网络可靠性。

## 四、客观评价

围绕项目重要科学发现，上述理论创新成果获发明专利 36 项，发表高水平论文 39 篇，出版专著 2 部，成果得到了中国、欧洲、加拿大等国家 10 余位院士、超过 20 位 IEEE Life Fellow/Fellow 等国际权威专家的正面引用和高度评价，产生了重要的学术影响，具体如下：

### 1、第三方鉴定与评价

(1) 2025 年 5 月 6 日，中国指挥与控制学会在北京召开了“卫星通信多域资源协同感知与传输关键技术”科技成果鉴定会。经尹浩院士担任主任的鉴定委员会评价，所提多节点协作频谱感知技术、智能资源分配与高效预编码技术等**成果技术复杂，研究难度大，成果原创性强，整体技术达到国际先进水平**。成果已在某卫星抗干扰通信系统升级、某型号卫星互联网工程中得到应用，军事、社会效益显著，推广应用前景广阔。

(2) 2025 年 8 月 13 日，中国通信学会在北京召开了“空间频谱感知、态势生成与捷变传输技术及应用”科技成果评价会。经张平院士等专家讨论鉴定如下，该项目所提技术难度极大，具有重大科技创新，技术成熟、完备、可靠，项目成果具有完全自主知识产权。**总体技术达到了国际先进水平**，其中基于多谱域特征分析与多节点协作的粗细感知的高精度频谱感知方法、面向动态频谱随机接入的智能博弈与跳波束干扰抑制的捷变传输方法、空间电磁频谱感知与捷变传输高效融合的新型空间通信系统**处于国际领先**。

### 2、国内重要科技奖励

(1) 本项目部分技术支撑获得“**2025 年中国通信学会科学技术奖一等奖**”，该奖项针对我国天基通信系统在复杂电磁干扰下“测不准、辨不明、跟不上、融合难”的核心挑战，表彰项目组历经十余年攻关形成的完整技术体系。核心创新成果包括：①高精度频谱感知与态势生成。②动态频谱捷变传输机制。③感通一体化卫星通信系统。

(2) 本项目部分技术支撑获得“**2025 年中国指挥与控制学会科学技术进步奖（技术发明类）二等奖**”，该奖项聚焦卫星通信频谱资源高效利用与安全传输的关键技术瓶颈，表彰项目组在多域资源协同感知与智能传输方面的原创性算法发明。核心发明点包括：①多节点协作频谱感知技术。②智能资源分配与高效预编码技术。③逆向符号级安全预编码技术。

### 3、国内外同行学术评价

(1) 发明点 1 的代表性评价：**澳大利亚悉尼科技大学电气与数据工程学院院长 Eryk Dutkiewicz** 在期刊 IEEE Internet of Things Journal 上发表的论文《A Novel Satellite-Based REM Construction in Cognitive GEO-LEO Satellite IoT Networks》引用了本成果相关论文《Green integrated cooperative spectrum sensing for cognitive satellite terrestrial networks》，充分肯定我们在认知卫星网络频谱感知研究中对频谱效率和能量效率进行联合优化的工作；

(2) 发明点 2 的代表性评价：**IEEE Fellow，澳大利亚悉尼科技大学计算机**

科学学院教授和大学研究委员会的副主席 **Shui Yu** 在 IEEE TWC 发表论文《Joint Beamforming and Illumination Pattern Design for Beam-Hopping LEO Satellite Communications》引用了本成果相关论文，肯定了我们提出的自适应资源调整方法“能够高效利用星间链路通信系统中时域和功率域资源”；**浙江大学求是特聘教授，IEEE TWC 等期刊编委张朝阳**发表在 IEEE Journal on Selected Areas in Communications 上的论文《Energy Efficient Semantic Communication Over Wireless Networks With Rate Splitting》引用了本成果相关论文，引文描述为：“与非正交多址接入（NOMA）和空分多址接入（SDMA）相比，在频谱效率与能量效率方面，速率分割多址接入（RSMA）能够实现最优性能 [19]。”；**IEEE Fellow, 北京邮电大学副校长，2018 年海因里希·赫兹最佳论文奖获得者彭木根教授**发表在 IEEE TWC 上发表论文《Dynamic Multiple Access Based on RSMA and Spectrum Sharing for Integrated Satellite-Terrestrial Networks》引用了本成果相关论文，评价为“已有研究基于智能超表面网络（ISTN）对速率分割多址接入（RSMA）展开研究，支持更多终端接入 [38]，并实现最大最小速率公平性。”

（3）发明点 3 的代表性评价：**IEEE Fellow, 英国伦敦国王学院工程系通信工程讲席教授、通信研究中心主任 Marco Di Renzo**，发表在 IEEE Communications Surveys & Tutorials 上的论文《Multi-Satellite Collaborations: Conception, Merits, Mechanisms, and Prospects》引用了本成果相关论文：“另一种新兴方向采用启发式和多目标优化技术，例如通过随机爬山策略的多目标服务相关路径优化 [89]，专门为超大规模低地球轨道（MLEO）星座网络开发。”；**IEEE Fellow, 香港理工大学计算机系讲席教授 Zhang Lei**，发表在 IEEE Transactions on Image Processing 上的《Perception-Distortion Balanced Super-Resolution: A Multi-Objective Optimization Perspective》中引用了本成果相关论文，引文描述为“目前已有多种基于 CUDA 技术的并行计算方法 [85] 可加速进化算法的执行过程”；**IEEE Fellow, 2025 年 IEEE 弗兰克·罗森布拉特奖获得者金耀初**在 IEEE Transactions on Evolutionary Computation 上发表的论文《Surrogate-Assisted Neighborhood Search With Only a Few Weight Vectors for Expensive Large-Scale Multiobjective Binary Optimization》中引用了本成果相关论文，引文描述为“PPLS/D-C&A 算法 [38] 将搜索空间划分为多个子区域，并结合协同搜索机制与协同子区域调整策略，对子区域开展并行搜索。”；**IEEE Fellow, 国家高层次人才 Zhang Jun** 在 IEEE Transactions on Industrial Informatics 上发表的《A Cooperative Evolutionary Computation Algorithm for Dynamic Multiobjective Multi-AUV Path Planning》中引用了本成果相关论文，并评价到“为解决多目标优化问题，使用帕累托局部搜索算法会生成大量初始解，并对其邻域进行搜索[24]。”

## 五、应用情况和效益

### 1、应用情况

本研究相关技术已应用于某高轨卫星等多个国家重大工程中,并在低轨通信系统、卫星宽带业务平台等领域有着广泛的应用,未来将在高通量卫星、国家卫星专网等多个军事、民生领域发挥重要的应用价值。具体应用效果及应用证明列表如下:

#### (1) 复杂电磁态势智能感知与生成方法应用成果

本研究中,以下相关技术成功赋能多型装备与系统,实现了感知能力的快速提升:融合多域特征的智能识别技术成功应用于某高轨卫星(01/02星)宽带信号分析器载荷,使我国首次具备特定频段的高轨通信信号智能感知能力;高精度频谱地图重构方法应用于国家消防救援局卫星专网及海上卫星宽带系统,推动系统频谱利用率大幅提升35%,用户端误码率显著降低25%;时空联合表征的频谱态势生成技术成功支撑无人机卫通系统研制中,实现干扰环境下频谱地图生成精度高达98%,定位误差严格控制在0.01米以内。

#### (2) 高效率资源分配和跳波束干扰抑制捷变传输方法应用成果

本研究中,以下相关技术有效解决了空间通信资源受限与干扰难题,保障了通信的高效与稳定:基于频谱感知生成辅助的高速波束捷变传输技术应用于某低轨卫星通信系统,为“侦、通、控”一体化新型空间通信系统提供了关键支撑;毫米波跳波束资源分配优化技术与新型波束捷变多址接入技术应用于某跳波束通信系统与地面设备,通过多维资源协同,实现干扰抑制效果达97.3%,资源分配时效提升62%;星地一体化高覆盖资源分配技术应用于南京熊猫汉达通信业务系统,依托自适应波束控制,成功减少地面服务盲区35%,降低服务时延36.2%。

#### (3) 多目标数据驱动的星间多跳路由传输方法应用成果

本研究中,以下相关技术显著增强了大规模星座的传输可靠性与网络韧性,保障了数据链路畅通:基于正则映射的多业务自调整路径优化方法及抗毁路径规划算法成功应用于某通信卫星系统及地面设备研制,实现了大规模卫星组网下高吞吐量、低延迟的路由规划;高可靠星间传输的故障感知与多目标路径协同优化方法应用于某卫星星座研制,确保了复杂网络环境下的可靠数据传输;卫星组网高可靠传输关键技术应用于高通量卫星应用系统,使得端到端时延波动降低58.4%,在10%节点失效极端情况下数据可达率仍保持94.5%,服务可用性不低于97.2%。

#### (4) 融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统应用成果

本研究中,相关技术完成了从理论到工程实现的转化,其中高可靠感通一体原型系统在某低轨星座项目中完成验证,成功实现了大规模组网下的高吞吐、低延迟可靠传输;融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输的智能处理平台支撑了新一代卫星研制,有效解决了空间动态频谱感知、星地资源调度与波束控制、星间组网路由传输与跨层协同等关键难题,充分满足了卫星数据高速传输的迫切需求,验证了复杂环境下感通一体的可行性。

表 1 主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称                | 应用的技术               | 应用对象及规模                                                                                       | 应用起止时间                 | 单位联系人/电话                |
|----|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1  | 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部 | 星载电磁频谱感知处理技术        | 应用于第一代某高轨卫星（02/03 星）宽带频谱分析器载荷研制与在轨测试，实现信号检测识别、测向、信道估计解调全流程处理，补齐我国该频段高轨频谱感知能力，为闭环立体感知系统建设奠定基础。 | 2020 年 5 月一至今          | 宫江雷<br>/1346665<br>4822 |
| 2  | 北京空间飞行器总体设计部        | 星载电磁频谱感知处理技术        | 应用于某高轨卫星（01/02 星）宽带信号分析器载荷中，在轨测试性能达到并优于系统指标，首次使我国具备在某频段的高轨通信信号智能感知处理能力。                       | 2021 年 12 月一至今         | 刘亚东<br>/1381058<br>6089 |
| 3  | 西安空间无线电技术研究所        | 复杂电磁环境下卫星多向高效传输关键技术 | 该技术所开发的卫星高可靠感通一体原型系统，在单星/多星在轨测试及特定区域/场景的演示验证中完成部署与应用，验证了大规模星座下高可靠端到端传输能力。                     | 2023 年 1 月一至今          | 翟继强<br>/1348462<br>0101 |
| 4  | 陕西航天技术应用研究院有限公司     | 毫米波跳波束卫星资源分配优化技术    | 应用于某卫星跳波束通信系统中，有效解决降雨环境下卫星通信中断的问题，完成关键技术验证，为后续毫米波通信技术的产业化提供重要技术支撑和参考。                         | 2021 年 4 月一至今          | 李力行<br>/1538861<br>0109 |
|    |                     | 复杂电磁环境下卫星多向高效传输关键技术 | 该技术所开发的卫星高可靠感通一体原型系统，已支撑多项国家重点型号卫星的地面测试、在轨试验与系统研制，用于解决其面临的复杂电磁环境下的传输难题。                       | 2023 年 10 月一至今         | 张婷婷<br>/1335928<br>4659 |
| 5  | 南京熊猫汉达科技有限公司        | 星地一体化高覆盖资源分配技术      | 应用于某通信卫星地面应用系统的研制与测试，有效解决了传统地面服务的覆盖盲区与传输延迟问题，显著提升了系统的服务可用性与响应效率。                              | 2020 年 5 月一至今          | 徐勇<br>/1865201<br>2066  |
| 6  | 北京航天科工世纪卫星科技有限公司    | 卫星组网高可靠传输关键技术       | 应用于某高通量卫星应用系统，实现系统卫星组网下服务可用性 $\geq 97.2\%$ ，为其大规模卫星组网下的高可靠数据传输提供了关键支撑。                        | 2023 年 5 月一至今          | 邵瑜<br>/1315247<br>1960  |
| 7  | 北京中航通用科技有限公司        | 跳波束干扰抑制捷变传输技术       | 应用于无人机卫通系统的研制，对卫星抗干扰、动态资源调度等相关技术的工程应用和推广形成了良好的辐射带动作用。                                         | 2023 年 1 月-至今          | 徐汉祥<br>/1381012<br>5345 |
| 8  | 凯睿星通信信息科技(南京)股份有限公司 | 电磁态势智能感知与生成技术       | 应用于卫星通信专网系统的研制建设，成功支撑了国家消防救援局卫星专网和海上卫星宽带工星通信等系统的建设。                                           | 2022 年 1 月-2025 年 12 月 | 王萌<br>/1385171<br>9128  |

## 2、应用效益

### (1) 直接经济效益

本项目围绕复杂电磁环境下卫星通信频谱感知、干扰抑制、资源调度及多向可靠传输等关键技术开展成果转化，相关技术已在北京中航通用科技有限公司、凯睿星通信息科技(南京)股份有限公司和西安保通防务科技有限公司实现应用。

北京中航通用科技有限公司应用跳波束干扰抑制捷变传输及相关物理层干扰抑制技术，通过波束方向动态调整、多维资源协同优化及交叉极化干扰抵消等手段，改善了复杂动态环境下卫星通信的可靠传输与资源利用效率，2023—2025年累计实现增收（节支）4200万元。

凯睿星通信息科技（南京）股份有限公司应用星载通信信号频谱感知技术，相关成果用于卫星通信专网系统，推动了频谱感知技术的装备化应用，2023—2025年累计实现增收（节支）3200万元。

西安保通防务科技有限公司应用融合频谱感知、资源调度、波束捷变、星间路由和自适应接收的多向智能高效传输技术，并结合多级协同同步处理流程开展工程应用验证，2023—2025年累计实现增收（节支）2800万元。

三家主要应用单位**近三年累计实现直接经济效益 10200 万元**，体现了项目良好的工程转化能力和产业应用价值。

表 2 主要应用单位直接经济效益情况表

| 序号 | 应用技术          | 出具单位               | 经济效益    |
|----|---------------|--------------------|---------|
| 1  | 跳波束干扰抑制捷变传输技术 | 北京中航通用科技有限公司       | 4200 万元 |
| 2  | 电磁态势智能感知与生成技术 | 凯睿星通信息科技（南京）股份有限公司 | 3200 万元 |
| 3  | 卫星多向智能高效传输技术  | 西安保通防务科技有限公司       | 2800 万元 |

### (2) 军事、社会效益

项目相关成果面向复杂电磁对抗环境下卫星通信保障需求，为高低轨卫星通信、电子侦察、抗干扰传输及新型空间通信系统研制提供了重要技术支撑。星载频谱感知技术已服务于相关型号载荷应用，跳波束干扰抑制捷变传输技术提高了复杂干扰条件下卫星通信的可靠性和安全性，多向智能高效传输及多级协同同步技术则增强了动态链路条件下的连续通信与可靠接收能力，对提升国防信息保障和复杂电磁环境下持续通信能力具有重要作用。

相关技术还可服务于卫星专网、应急救援、海上通信及边远区域通信等场景，为自然灾害、突发事件及特殊区域条件下的信息传输和应急通信提供技术保障，有助于提高社会公共安全和通信服务覆盖能力。同时，项目通过提高频谱、波束和功率等资源利用效率，促进卫星通信资源的集约化配置，对推动相关行业技术进步和高效利用资源具有积极意义。项目实施过程中形成了通信、人工智能、网络优化和系统工程等多学科交叉技术体系，并通过科研与工程实践培养了一批相

关领域专业人才，对提升卫星通信领域科技创新能力具有良好的带动作用。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

表 3 主要知识产权列表

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称                  | 国家<br>(地区) | 授权号              | 授权日期         | 证书编号    | 权利人          | 发明人                                        |
|----|--------|---------------------------|------------|------------------|--------------|---------|--------------|--------------------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种高动态下的星地扩频通信方法           | 中国         | ZL202411895524.1 | 2025. 04. 01 | 7846904 | 西北工业大学       | 李雄飞, 孙学敏, 郭阳明, 李斌, 姚如贵                     |
| 2  | 发明专利   | 一种基于跳波束的双层卫星网络功率和带宽联合分配方法 | 中国         | ZL202211318240.7 | 2025. 01. 24 | 7689756 | 西北工业大学       | 樊晔, 李童, 贺文正, 姚如贵, 左晓亚                      |
| 3  | 发明专利   | 一种高效低复杂度的宽带通信卫星全局波束跳变方法   | 中国         | ZL202210594913.5 | 2023. 11. 03 | 6452946 | 西北工业大学       | 姚如贵, 李童, 左晓亚, 樊晔, 王立波                      |
| 4  | 发明专利   | 基于符号级预编码方式转化卫星通信网络信息干扰的方法 | 中国         | ZL202210644591.0 | 2024. 06. 04 | 7066634 | 西北工业大学       | 樊晔, 杭瑞杰, 张子晔, 王晓菲, 崔欣然, 王颖凡, 姚如贵, 左晓亚, 宗亚雳 |
| 5  | 发明专利   | 一种扩频通信系统中扰信特征分离能力测试系统及方法  | 中国         | ZL202110660932.9 | 2023. 04. 14 | 5879034 | 西安空间无线电技术研究所 | 李雄飞, 翟继强, 赵伟, 孟向阳, 张旭, 李斌                  |

表 4 代表性论文专著列表

| 序号 | 论文专著名称 | 刊名 | 发表时间 | 年卷页码 | 作者 | 通讯作者<br>(含共同 | 第一作者<br>(含 | 检索<br>数据库 | 参与人<br>(成果完 | 知识产权<br>是否归国 |
|----|--------|----|------|------|----|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|
|----|--------|----|------|------|----|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|

|   |                                                                                                                         |                                                                          |                        |                                                       |                                                                                                                 |               |                 |                  |                           |     |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|------------------|---------------------------|-----|
|   |                                                                                                                         |                                                                          |                        |                                                       |                                                                                                                 | 作者)           | 共同作<br>者)       |                  | 成人)                       | 内所有 |
| 6 | SFCNN: Separation<br>and Fusion<br>Convolutional Neural<br>Network for Radio<br>Frequency Fingerprint<br>Identification | International<br>Journal of<br>Intelligent<br>Systems                    | 2024 年<br>11 月<br>28 日 | 2024 年<br>2024 卷,<br>Article ID<br>4366040,<br>1-17 页 | Shiyuan Wang,<br>Rugui Yao, Xiaoya<br>Zuo, Ye Fan,<br>Xiongfei Li,<br>Qingyan Guo,<br>Xudong Li                 | Xiaoya<br>Zuo | Shiyuan<br>Wang | WOS<br>所有数<br>据库 | 姚如贵、<br>樊晔、左<br>晓亚        | 是   |
| 7 | Pattern Design and<br>Power Management<br>for Cognitive LEO<br>Beaming Hopping<br>Satellite-Terrestrial<br>Networks     | IEEE<br>Transactions on<br>Cognitive<br>Communications<br>and Networking | 2023 年<br>7 月 28<br>日  | 2023 年 9<br>卷 1531-<br>1545 页                         | Tong Li, Rugui<br>Yao, Ye Fan,<br>Xiaoya Zuo,<br>Nikolaos I.<br>Miridakis,<br>Theodoros A.<br>Tsiftsis          | Ye Fan        | Tong Li         | WOS<br>所有数<br>据库 | 姚如贵、<br>樊晔、左<br>晓亚        | 是   |
| 8 | Rate-Splitting Multiple<br>Access-Enabled<br>Security Analysis in<br>Cognitive Satellite<br>Terrestrial Networks        | IEEE<br>Transactions on<br>Vehicular<br>Technology                       | 2022 年<br>7 月 19<br>日  | 2022 年 71<br>卷 11756-<br>11771 页                      | Xudong Li, Ye Fan,<br>Rugui Yao, Peng<br>Wang, Nan Qi,<br>Nikolaos I.<br>Miridakis,<br>Theodoros A.<br>Tsiftsis | Rugui Yao     | Xudong<br>Li    | WOS<br>所有数<br>据库 | 姚如贵、<br>樊晔                | 是   |
| 9 | Multi-Objective<br>Regular Mapping QoS<br>Path Planning for<br>Mega LEO<br>Constellation                                | IEEE<br>Transactions on<br>Communications                                | 2025 年<br>4 月 18<br>日  | 2025 年 73<br>卷 9704-<br>9719 页                        | Ye Fan, Zhi Liu,<br>Rugui Yao, Hao<br>Jiang, Jialong Shi,<br>Xu Yang, Xiaoya<br>Zuo, Victor C. M.               | Rugui Yao     | Ye Fan          | WOS<br>所有数<br>据库 | 姚如贵、<br>樊晔、左<br>晓亚、杨<br>旭 | 是   |

|    |                                                                                                                                        |                                        |                        |                                |                                                                            |                 |                |                  |    |   |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|------------------|----|---|
|    | Networks                                                                                                                               |                                        |                        |                                | Leung                                                                      |                 |                |                  |    |   |
| 10 | Improving Pareto<br>Local Search Using<br>Cooperative<br>Parallelism Strategies<br>for Multiobjective<br>Combinatorial<br>Optimization | IEEE<br>Transactions on<br>Cybernetics | 2022 年<br>12 月<br>20 日 | 2024 年 54<br>卷 2369-<br>2382 页 | Jialong Shi,<br>Jianyong Sun,<br>Qingfu Zhang,<br>Haotian Zhang, Ye<br>Fan | Jianyong<br>Sun | Jialong<br>Shi | WOS<br>所有数<br>据库 | 樊晔 | 是 |

## 七、主要完成人情况（不超过 6 人）

| 姓名  | 排名 | 行政职务 | 技术职称  | 工作单位         | 完成单位         | 对本项目贡献                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|----|------|-------|--------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 姚如贵 | 1  | 副院长  | 教授    | 西北工业大学       | 西北工业大学       | 全面参与了本项目所有发明点与系统研制，深入参与了“精细感知、由点及面”复杂电磁态势智能感知与生成和高效率资源分配和“动态适配、快速求解”跳波束干扰抑制捷变传输方法相关研究，为复杂电磁环境的智能感知奠定了算法基础，为动态场景下低干扰、高吞吐量、高效率的波束捷变传输方法的研究做出了核心贡献。与本项目相关的研究成果已形成多篇 IEEETrans.高水平论文与系列发明专利，并获得 2025 年中国通信学会科学技术奖一等奖、中国指挥与控制学会科学技术进步奖(技术发明类)二等奖。 |
| 樊晔  | 2  |      | 副教授   | 西北工业大学       | 西北工业大学       | 作为主要发明人参与了 3 项核心专利的研发，并全面参与了 5 篇高水平学术论文的发表。重点负责发明点 3 的研究工作，其中，创新提出了基于人工智能的空间电磁干扰预测与基于跳波束技术的动态干扰抑制方法，并面向大规模卫星组网提出基于几何映射解耦的低复杂度多目标路由策略，为系统的高效可靠传输提供了核心算法支撑。                                                                                    |
| 翟继强 | 3  |      | 高级工程师 | 西安空间无线电技术研究所 | 西安空间无线电技术研究所 | 主作为项目骨干，参与了 1 项核心专利的研发与系统实现工作，重点负责发明点 4 中有关融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统的实测与工程实现工作，将本项目相关理论模型与算法在天基平台受限条件下进行部署、验证与优化，为研究成果的落地应用提供了关键支撑。                                                                                                              |
| 左晓亚 | 4  |      | 副教授   | 西北工业大学       | 西北工业大学       | 作为主要发明人，参与了 3 项核心专利的研发，与第一完成人共同发表高水平学术论文 3 篇。重点参与了发明点 2 的技术攻关工作，针对复杂电磁环境下的感知难题，深入参与了基于分离与融合卷积                                                                                                                                                |

|    |   |  |     |              |              |                                                                                                                                   |
|----|---|--|-----|--------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |   |  |     |              |              | 神经网络的精细感知算法的设计与优化；面向动态资源分配需求，为自适应波束功率分配算法的模型构建与效能提升做出了实质性贡献，有效提高了系统整体性能。                                                          |
| 杨旭 | 5 |  | 研究员 | 西安空间无线电技术研究所 | 西安空间无线电技术研究所 | 与第一完成人共同发表高水平学术论文 1 篇，深入参与了发明点 3 中基于轨道力学规律与星历数据的动态拓扑建模工作，提出了适用于大规模星座的轻量化拓扑预测方法，并参与本项目在实际在轨测试中的星座搭建与数据提取工作，为在高动态环境下准确感知网络连通性奠定了基础。 |
| 李斌 | 6 |  | 工程师 | 西安空间无线电技术研究所 | 西安空间无线电技术研究所 | 参与了 2 项核心专利的研发，深度参与了发明点 4“融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统”的高性能工程实现工作，构建了面向复杂电磁环境的卫星专用测试验证体系，为系统核心模块的性能评估与抗干扰能力量化提供了关键工具，有效保障了工程样机的可靠性与鲁棒性。  |

## 八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

| 完成单位         | 排名 | 对本项目主要贡献（限 600 字）                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 西北工业大学       | 1  | 西北工业大学作为本成果的主要完成单位，为研究的顺利开展提供了全方位的政策、团队、场地及后勤保障。研究工作主要依托西北工业大学“无人飞行器技术”全国重点实验室等科研平台完成。在具体技术贡献上，本单位全面参与了 5 篇代表性论文的撰写、发表，以及专利 1 至专利 4 的发明工作，对四个核心创新点均提供了有力支撑:主导并深度完成了创新点 1 “复杂电磁态势智能感知与生成方法”和创新点 2 “高效率资源分配与跳波束干扰抑制捷变传输方法”的研发:参与完成了创新点 3 “多目标数据驱动的星间多跳路由传输方法”和创新点 4 “融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统”的攻关。此外，还参与完成了该项目系统级平台的搭建、仿真与测试工作。西北工业大学的科研管理、财务等部门为本成果相关项目的日常管理和成果申报提供了重要帮助。                       |
| 西安空间无线电技术研究所 | 2  | 西安空间无线电技术研究所在本成果的研究与验证过程中发挥了关键作用:在科研合作与成果产出方面，该单位与第一完成单位密切协作，共同完成并发表了 2 篇与本成果高度相关的学术论文，并独立完成了 1 项相关专利的研发与申请。在关键技术攻关层面，研究所承担了主要研发任务，特别是主导完成了创新点 4 “融合卫星电磁态势感知与多向智能高效传输系统”的整体方案设计与技术实现，并在创新点 1 “复杂电磁态势智能感知与生成方法”中协同参与了部分核心算法的研究与优化，为成果的系统性创新提供了重要支持。此外，该所依托自身成熟的卫星研制平台与在轨验证能力，将本成果相关硬件系统实际部署于天基平台，成功完成了在轨测试任务，有效验证了系统在真实空间电磁环境中的可靠性与适应性，从而为系统接收端的高效自适应设计提供了不可或缺的核心技术支撑与实证依据，有力推动了成果从理论到应用的转化。 |

## 九、完成人合作关系说明

| 序号 | 合作方式   | 合作者/项目排名                  | 合作时间       | 合作成果                                                                                                                 | 证明材料           |
|----|--------|---------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1  | 论文合著   | 姚如贵（1）、樊晔（2）、左晓亚（4）、杨旭（5） | 2025.04.18 | Multi-Objective Regular Mapping QoS Path Planning for Mega LEO Constellation Networks                                | 代表性论著 1: TCOM  |
| 2  | 论文合著   | 樊晔（2）                     | 2022.12.20 | Improving Pareto Local Search Using Cooperative Parallelism Strategies for Multiobjective Combinatorial Optimization | 代表性论著 2: TCYB  |
| 3  | 论文合著   | 姚如贵（1）、樊晔（2）、左晓亚（4）       | 2023.07.28 | Pattern Design and Power Management for Cognitive LEO Beaming Hopping Satellite-Terrestrial Networks                 | 代表性论著 3: TCCN  |
| 4  | 论文合著   | 姚如贵（1）、樊晔（2）              | 2022.07.19 | Rate-Splitting Multiple Access-Enabled Security Analysis in Cognitive Satellite Terrestrial Networks                 | 代表性论著 4: TVT   |
| 5  | 论文合著   | 姚如贵（1）、樊晔（2）、左晓亚（4）       | 2024.11.28 | SFCNN: Separation and Fusion Convolutional Neural Network for Radio Frequency Fingerprint Identification             | 代表性论著 5: SFCNN |
| 6  | 共同知识产权 | 姚如贵（1）、李斌（6）              | 2025.04.01 | 一种高动态下的星地扩频通信方法                                                                                                      | 发明专利 1         |
| 7  | 共同知识产权 | 姚如贵（1）、樊晔（2）、左晓亚（4）       | 2025.01.24 | 一种基于跳波束的双层卫星网络功率和带宽联合分配方法                                                                                            | 发明专利 2         |
| 8  | 共同知识产权 | 姚如贵（1）、樊晔（2）、左晓亚（4）       | 2023.11.03 | 一种高效低复杂度的宽带通信卫星全局波束跳变方法                                                                                              | 发明专利 3         |

|    |            |                                     |            |                                   |           |
|----|------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------------|-----------|
| 9  | 共同知识<br>产权 | 姚如贵<br>(1)、樊<br>晔(2)、<br>左晓亚<br>(4) | 2024.06.04 | 基于符号级预编码方式<br>转化卫星通信网络信息<br>干扰的方法 | 发明专利<br>4 |
| 10 | 共同知识<br>产权 | 翟继强<br>(3)、李<br>斌(6)                | 2023.04.14 | 一种扩频通信系统中扰<br>信特征分离能力测试系<br>统及方法  | 发明专利<br>5 |