



电磁频谱空间应用及发展趋势综述

谢春茂^{1,2}, 张川², 黄明², 刘红军², 李恩¹, 杨仕文^{1*}

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731; 2. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要 近年来, 电磁频谱空间已逐步发展成为大国博弈的必争领域, 成为国家的战略稀缺资源。在民用电磁频谱领域, 电磁频谱拥挤、应用业务激增, 在宽带频谱监测、频谱安全、频谱大数据及智能化应用方面面临着巨大挑战; 军用电磁频谱博弈对抗愈加激烈, 电磁频谱感知、监测及影响效应评估面临感知手段有限、频谱管控和协同应用能力不足等难题。该文首先回顾了典型电磁频谱应用现状、面临的挑战及国外发展趋势。然后, 分析了国内电磁频谱空间总体设计和规划管理、典型工程实践和关键技术突破情况。最后, 给出了我国电磁频谱空间应用的发展思路。

关键词 电磁频谱空间; 频谱应用; 频谱管控; 频谱监测

中图分类号 V37 文献标志码 A DOI 10.12178/1001-0548.2023059

A Review of the Applications and Development Trends of Electromagnetic Spectrum Space

XIE Chunmao^{1,2}, ZHANG Chuan², HUANG Ming², LIU Hongjun², LI En¹, and YANG Shiwen^{1*}

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract In recent years, the electromagnetic spectrum space has gradually developed into a competitive field in the game of big powers in the world, which is also one of the national strategic scarce resources. In civil electromagnetic spectrum, along with the spectrum congestion and fast growing of application services, the applications of broadband spectrum monitoring, spectrum security, big data of spectrum and intelligence have been facing great challenges. Competition games of military electromagnetic spectrum has become even more intense, and electromagnetic spectrum perception, monitoring and impact effect evaluation are facing problems such as limited sensing approaches and insufficient capabilities in spectrum management, control and collaborative applications. Firstly, the recent status, challenges, and development trends in abroad of typical electromagnetic spectrum space applications are reviewed. Then, the domestic studies on overall design, planning management, typical engineering practices and key techniques for electromagnetic spectrum applications are analyzed. Finally, some development suggestions on domestic electromagnetic spectrum space applications are summarized and presented.

Key words electromagnetic spectrum space; spectrum application; spectrum management and control; spectrum monitoring

电磁频谱空间是继陆海空天网传统五大作战领域之后的超级作战领域, 也是一个国家的战略稀缺资源。在民用电磁频谱应用方面, 无线电子设备数目的迅猛增长导致民用频谱的可用资源紧张、频谱冲突和频谱安全问题凸显。传统静态规划、分配频率资源对授权频段利用具有排他性和独占性, 频谱资源利用效率较低。随着 5G、工业物联网、车联网、星链为代表的卫星互联网等数据业务不断增

长, 对民用电磁频谱管理工作带来了较大挑战^[1-2]。为更好地服务国民经济发展, 需进一步做好民用分布式宽带频谱监测、多业务电磁频谱兼容性与抗扰性分析以及基于大数据的电磁频谱资源规划等工作。同时, 在国家无线电委员会无线电频谱规划的基础上, 需进一步构建全国分区域电磁频谱监测网络, 形成电磁频谱态势图, 进而对电磁频谱进行精细规划和分配, 实现用频业务全周期动态管理。

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-19

作者简介: 谢春茂, 博士生, 研究员, 主要从事航空电子系统设计、射频隐身技术、材料电磁性能测试等方面的研究。

*通信作者 E-mail: swnyang@uestc.edu.cn

在军事频谱应用方面，作战双方围绕夺取战场制信息权和制电磁权的对抗将愈发激烈。战场电磁频谱精准感知、电磁态势分发、用频决策、频谱管控、频谱服务将直接关系到各级部队指挥决策、作战行动以及武器装备效能发挥^[3-4]。为做好电磁频谱顶层规划、频谱态势感知、频谱推理与动态管控以及频谱效能评估与应用至关重要。

本文针对当前军用、民用频谱应用的共性和差异化应用需求，首先分析了无线电频谱民用和军事应用的国内外现状；接着分析了无线电频谱面临的各种严峻挑战；然后从频谱顶层设计与规划、频谱态势感知、频谱管控和电磁频谱应用试验验证等方面分析了国外电磁频谱的发展趋势；最后从总体设计和规划管理、工程实践和关键技术应用 3 个层面梳理了我国电磁频谱应用的发展现状和发展对策。

1 电磁频谱空间应用现状

国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）定义了 300 GHz 以下为无线电电磁波频谱，电磁频谱资源作为基础性、稀缺性核心战略资源，由于受到电波传播特性、技术等各方面的限制，实际上目前使用频段在几十吉赫兹范围内，主要包含广播、移动通信、卫星通信、雷达卫星遥感、卫星导航等民用和军用系统。目前，民用电磁频谱的应用主要依据国际组织和各国无线电管理机构进行分配和规划。军事频谱资源主要在战前集中指配，大部分频谱资源作为授权频段，缺乏灵活性、利用率较低。电磁频谱应用正革命性地改变着人们的生活和工作方式以及军事作战的模式和概念^[5]。

1.1 民用电磁频谱应用

目前国际上管理民用频谱资源的是 ITU，ITU 将世界划分为 3 个频率分区：第一区域为欧洲和非洲，第二区域为北美洲和南美洲，第三区域为亚洲和澳洲，不同区域的某些业务频率略有差异。ITU 频段划分涵盖了多种目前电信领域广泛应用的业务，不同的业务使用不同的频率以避免冲突^[6]。

我国由无线电管理局指导各省（自治区、直辖市）无线电管理机构依法履行无线电监管职能。民用无线电短波监测网、卫星监测网日益完善，民用无线电管理信息网建设也取得新进展，设备检测能力不断增强，为无线电管理机构维护空中电波秩序，提供了有效技术支撑。

近年来，世界主要强国在卫星频率轨道资源方面的竞争已日趋白热化，以星链为代表的卫星互联

网系统在国际上抢占了大量低轨卫星通信频率资源。此外，5G、工业物联网、车联网等新技术与新应用的加速发展，也促使公众移动通信承载的数据业务不断增长，其所需的频谱带宽也越来越大。随着民用频谱资源的日益拥挤和频谱冲突加剧，有必要开展重要业务和重点频段保护性监测，做好民航、铁路、轨道交通等单位频率保护工作；结合 5G、卫星互联网等新业务，推进台站分级分类管理，有效保护重要无线电台（站）；开展无线电“反作弊”工作，严查利用无线电设备从事考试作弊的行为；开展打击治理“黑广播”“伪基站”专项行动，保障人民群众生命财产安全；提升对无人机信号管控，消除其对民航的干扰，做好防范利用无人机走私；健全重大活动无线电安全保障机制，做好重大活动无线电安全保障工作。

1.2 军用电磁频谱应用

随着体系化对抗的加剧，战场空间的态势感知、信息获取、指挥与控制、导航定位以及电磁攻击和防护等用频设备数量越来越多、频率覆盖越来越宽，电磁信号在时频空能各个维度呈现拥挤、高动态、时变等特性^[7]。

随着电磁频谱在军事领域的广泛应用，人为的和自然的、敌方的和我方的、对抗的和非对抗的各种电磁信号充斥于作战空间，综合形成了一个信号密集、种类繁多、对抗激烈、动态多变的复杂电磁频谱空间。复杂电磁频谱空间通过全局域、单元级、信号级和参数级进行总体复杂程度表征：某时间段内信号越多、分布密度越大，电磁频谱空间的时域越复杂；某频段内信号频率覆盖范围越大、频率捷变越快，电磁频谱空间的频域越复杂；信号分布越密集、功率动态范围越大、平均功率密度越大，电磁频谱空间的能量域越复杂；调制信号样式越多，信号极化样式变化越多，电磁频谱空间波形域越复杂。

在战场地域内应做好作战用频协同和频谱管控，各用频设备实现独立工作，避免作战使用中相互干扰、互不兼容等问题。同时利用频谱感知系统形成实时电磁空间态势，从而有效地掌握电磁频谱作战优势和控制权，最大限度地提升我方电磁装备的作战效能，同时规避敌方的电磁频谱威胁，是现代信息化战争获胜的关键。

2 电磁频谱空间应用面临的挑战

电磁频谱空间应用面临平台类型多、业务多、

频谱拥挤、可用频谱资源受限、频谱作战动态多变、用频装备多域协同等问题, 在频谱资源规划和共享、频谱管控、电磁频谱互操作等方面面临巨大挑战。

2.1 民用电磁频谱空间应用面临的挑战

民用电磁频谱应用正朝着更高频段、更大带宽、更低功率方向演进, 新技术、新业务、新设备层出不穷, 迫切要求无线电管理机构升级技术手段, 不断提高无线电监管专业化水平。我国目前对卫星互联网信号和地面终端的监控能力略显不足, 亟待建设卫星互联网监测与反制等特色应用; 针对全国分布式频谱监测设备采集的多源电磁环境数据, 需建设电磁频谱大数据平台, 实现全国各大监测站监测数据互联互通及融合分析, 提升电磁频谱态势与研判能力; 针对现有地面监测网络在空域覆盖、频域覆盖、目标覆盖等方面的不足, 需扩展全国监测网络, 服务民航、铁路、水上等重点行业。

2.2 军用电磁频谱空间应用面临的挑战

电磁频谱空间已成为继陆、海、空、天、赛博传统五大作战领域之后的又一个新的作战域, 电子战行动、电磁频谱战、频谱管理等诸多理念的提出, 都是基于“电磁频谱是一个作战域”这一理念。电磁频谱战是由两个及以上部队开展的用于利用、攻击、防护和管理电磁作战环境的协同军事行动。频谱管理行动是指在军事行动全阶段共同促成计划、管理和实施电磁作战环境内作战行动的频谱管理、频率分配、政策遵循、冲突消除等相互联系的功能。各概念间关系与范畴如图1所示。

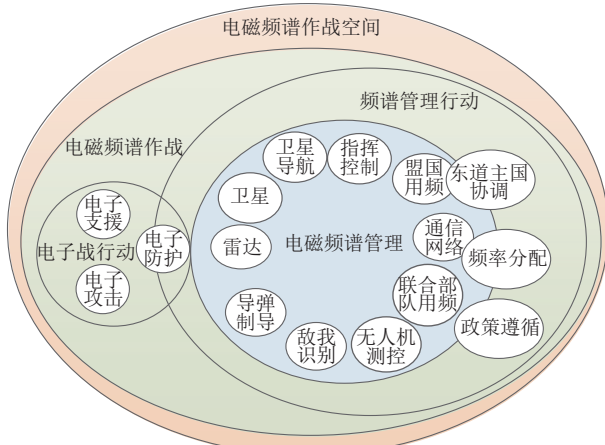


图1 电磁频谱作战域概念关系

1) 战场电磁频谱优势争夺加剧、对抗愈加激烈
电磁频谱对于军事作战的重要作用促使电磁频谱领域内的对抗愈加激烈, 一方面要压制敌方使用

和控制电磁频谱的能力, 通过电磁频谱战、赛博攻击等技术手段来降低敌方的电磁态势感知能力; 另一方面采用频谱认知、智能化频谱预测与推理、动态频谱管理等技术, 保证己方能够自由使用和控制电磁频谱^[8]。同时提高频谱的利用效率, 不断积累对应用频装备的电磁频谱特性详细数据, 支撑体系作战电磁频谱规划、冲突分析、干扰排查和协调管理。

2) 协同作战全域电磁频谱互操作问题凸显

体系协同作战已成为目前的主要作战方式, 各作战平台通信系统之间的互操作是协同的前提^[9]。然而, 目前多种跨域异构平台的通信波形、链路、网络不能互联互通, 电磁频谱作战应用不能协同互操作, 电磁态势不能共享, 已成为制约电磁频谱全域协同作战的瓶颈短板。因此, 需整合满足全球用频电磁环境中雷达系统、导航系统、通信系统、电子战系统、民用系统、联合系统和商用现货供应等系统的频谱需求, 在联合战争支持、联合特遣部队实施、联合军事行动、电子战、电磁频谱管理中进行协同应用。

3 国外电磁频谱空间应用的发展趋势

国外对电磁频谱空间应用的研究起步较早, 主要从电磁频谱顶层设计与规划、频谱态势感知、频谱管控和电磁频谱空间应用试验验证等方面开展了系统地研究, 战场电磁频谱应用系统已经装备部队并投入了实战。

1) 电磁频谱空间顶层设计和规划

美国从电磁频谱战顶层规划、优化调整部队编制、升级电磁频谱战武器装备、强化演习训练等方面, 提升电磁频谱作战能力。文献[9]提出了联合电磁频谱作战基本概念, 给出电磁环境效应、联合电磁频谱作战与其他联合作战行动之间的关系; 介绍了联合电磁频谱作战中的职责划分、组织机构、军种支持、情报支持组织以及多国部队组织; 详细论述了联合电磁频谱作战中的规划流程、规划考虑因素、多国作战规划考虑因素以及跨机构规划考虑因素; 联合电磁频谱作战实施, 介绍了联合电磁频谱作战中的执行与效能评估过程。

文献[10-12]阐明了电磁频谱优势的目标就是确保并保持对电磁频谱的接入、应用、攻击和机动。美军全球电磁频谱信息系统(GEMSIS)是美军典型的频谱管理工具, 该系统的预期目标是: 在网络中心服务环境下, 通过综合利用各种现有的、新兴的能力与服务, 实现美军电磁频谱作战

模式的转型, 达到随时随地智能化(认知化)与自主化的频谱接入, 为美军提供更好的频谱感知态势图, 可将美军所有的频谱作战行动一体化, 具备远征能力、网络化、分布式的适应性强的频谱应用于控制, 提升频谱作战的决策优势和高度杀伤力^[13]。

2) 电磁频谱感知

2016年, 美国国防高级研究计划局(DARPA)的“高级射频地图”(Radio Map)系统(如图2)已经在美国海军陆战队中使用^[14], 并为其提供实时频谱态势感知能力(包括频域、时域、空域态势)。该系统为战术部队提供改进型射频地图, 包括其周边的电磁频谱态势、电磁频谱行动预测、电磁频谱特征统计, 可以更好地了解信号的特征, 如是敌是友、是否需要重点关注、是否需要提示其他传感器进一步分析等。

2016年底, DARPA授予SSC公司一份电磁频谱认知专项技术合同, 用以支持用频设备对机会频谱共享关键技术的研究。2017年4月, DARPA还发布了基于机器学习的电磁环境认知与推理研究项目^[15]。美国国防部正在研究人工智能的电磁频谱处理技术: ①认知电子战系统, 该系统利用人工智能识别新的电子发射, 确定发射是否来自对抗方, 并开发有效的干扰信号; ②用先进的计算能力改进电子欺骗(如用数字射频存储器来产生虚假的雷达回波); ③用人工智能进行动态频谱共享, 按照跨频段的业务量变化动态分配频谱^[16]。

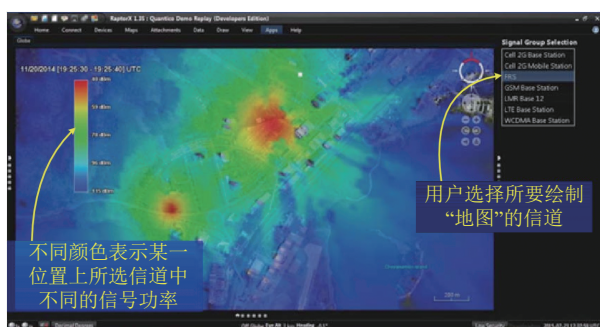


图2 Radio Map“热图”示意图

DARPA最新支持的“频谱挑战赛”项目^[17-19]更是旨在发展频谱空间认知技术, 使得用频装备能够动态适应频谱变化, 自主确定何时、何地、如何使用不同的频谱。

3) 电磁频谱管控

美军设计了无线频谱资源管理指导计划和方针政策, 并研发出了相应的频谱管理系统。美军关于

无线电频谱管理的研究, 其发展大致经历了4个阶段^[20]:

①将频谱管理与通信装备相结合, 使设备拥有协同频率管理功能;

②实现短波频段实施战术频谱管理, 能实时监测频段频谱, 预报最佳频率;

③解决联合作战中战场频率的指配问题;

④研究全频段频谱管理, 解决各种频率管理工具的兼容性问题;

电磁频谱管控正朝着由事先规划向智能化、多模式管控的自主策略智能闭环管控的方向发展。

4) 电磁频谱军事应用的试验验证

美军在电磁频谱战的军事应用试验处于领先地位, 美国国防部选择12个军事基地进行试验验证^[21]:

①奥尔巴尼海军陆战队后勤基地(评估电磁频谱战智能仓库);

②圣地亚哥海军基地(评估电磁频谱战智能仓库);

③希尔空军基地(评估机载雷达的频谱共享);

④刘易斯·麦考德联合基地(评估电磁频谱战增强现实/虚拟现实);

⑤内利斯空军基地(评估指挥、控制和网络增强);

⑥诺福克海军基地(评估海军电磁频谱战);

⑦珍珠港-希卡姆联合基地(评估飞机战备电磁频谱战);

⑧圣安东尼奥联合基地(增强对保障和训练的支持, 评估美国国防部电磁频谱战安全试验网络);

⑨廷克空军基地(评估军事通信与电磁频谱战之间的频谱共享);

⑩彭德尔顿营地(评估未来作战基地和战术作战中心的连接试验);

⑪胡德堡陆军基地(评估未来作战基地和战术作战中心的连接试验);

⑫欧文堡陆军国家训练中心(评估未来作战基地和战术作战中心的连接)。

4 国内电磁频谱空间应用及发展思路

国内电磁频谱空间应用相关技术研究起步稍晚, 但也受到各个领域的高度重视, 在电磁频谱的顶层设计与规划、电磁频谱空间仿真与动态模拟、战场电磁频谱精准测试验证、电磁频谱闭环管控等总体设计层面、电磁频谱工程实践层面及相应关键

技术正逐步提升^[22]。

4.1 电磁频谱空间应用总体设计

1) 军民融合的电磁频谱应用总体设计和规划

面对民用和军用的密集复杂电磁环境, 如何对电磁频谱进行有效管理, 现已成为确保空间电磁频谱感知、用频协同和频谱安全的决定性技术。针对多种使用场景下的动态频谱协同运用以及多层级的频谱管控要求, 使用如图3所示的总体设计和全局

规划方式, 采用自协同多模式频谱管控系统对空间电磁频谱动态实时管控, 以解决军用和民用场景中用频策略僵化、延迟高等难题, 突破电磁频谱推理预测和电磁频谱策略生成与分发等关键技术, 实现用频设备频谱的合理分配与频谱资源的共用, 为信息化设备提供高层次、智能化的频率管理方案, 提升设备间的电磁兼容性, 并根据实时获取的电磁态势动态调整用频计划^[23-24]。

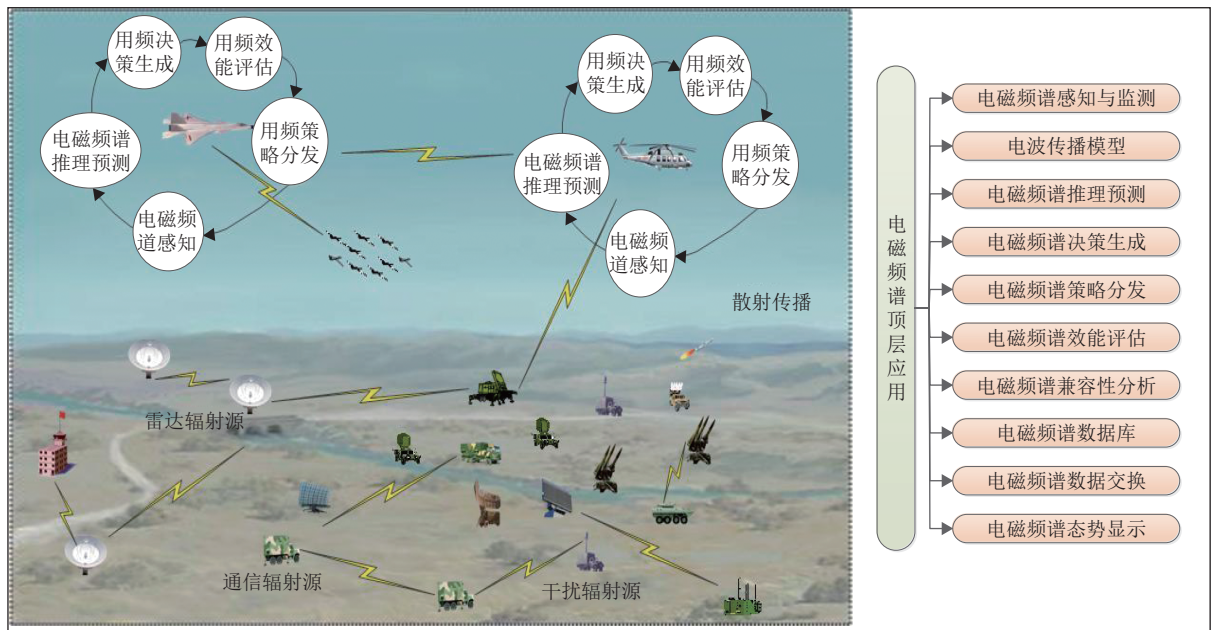


图3 军民融合的电磁频谱空间应用总体规划

2) 复杂战场电磁频谱空间环境仿真与动态模拟
针对强对抗条件下陆海空天的电磁频谱空间表征难、精准预测难、装备效能精确量化动态评估难、用频筹划智能辅助决策缺乏等问题, 研究高精度近实时陆海空天战场电磁环境动态仿真预测、复杂战场空间电磁环境建模分析, 如图4所示。通过复杂电磁环境的构建, 研究装备电磁环境效能评估, 突破电磁环境多维度、多粒度建模与表征方法、电磁环境风险等级判断与评估、电磁环境对作战装备效能影响评估等关键技术, 为联合对抗条件下的装备用频分配指配与协同运用、战场综合电磁态势生成等提供支撑^[25-26]。

3) 复杂电磁频谱空间精准测试验证

针对复杂电磁频谱的“测不准、管不住、用不好”等问题, 充分运用电子对抗、技术侦察、情报处理、频谱管理等既有业务成果, 开展电磁空间测量和试验验证等技术研究^[27]。建立如图5所示的电磁频谱测试验证系统, 通过电磁频谱测量、电磁空

间管控、电磁空间运用等方面的测试验证, 推动从实验室测量能力向电磁战场高精度测量能力的转变。整合现有电磁频谱测量设备, 发展各种平台用实时频谱测量与信号分析设备、电磁空间一体化测量系统, 全面获取电磁作战环境要素信息; 电磁空间管控通过引接、融合各种电磁空间信息, 对电磁空间作战行动相互影响进行评估。在此基础上, 对涉频作战行动频谱使用进行一体协同筹划; 电磁空间运用基于作战目标和装备性能, 从战役战术运用角度, 实现电磁空间作战力量控制和体系效能发挥, 为获取电磁空间优势提供支持。

4) 多模式电磁频谱智能化 OODA 闭环管控

针对电磁频谱管控难题, 将自协同多模式频谱管控流程映射到认知 OODA 环路模型中, 依次进行电磁频谱态势感知 (O)、频谱推理和预测 (O)、协同用频和用频策略生成 (D)、用频策略表征及策略分发 (A), 实现完整的 OODA 环路, 如图6所示。突破电磁频谱应用管控架构、电磁频谱系统

动态协议规范、数字频谱表征关键技术，实现从预规划的、静态的频谱作战模式，向动态的、响应型

的、智能化的频谱作战模式转变，以求在设计、指配和频谱使用上更符合未来战场需求^[28-29]。

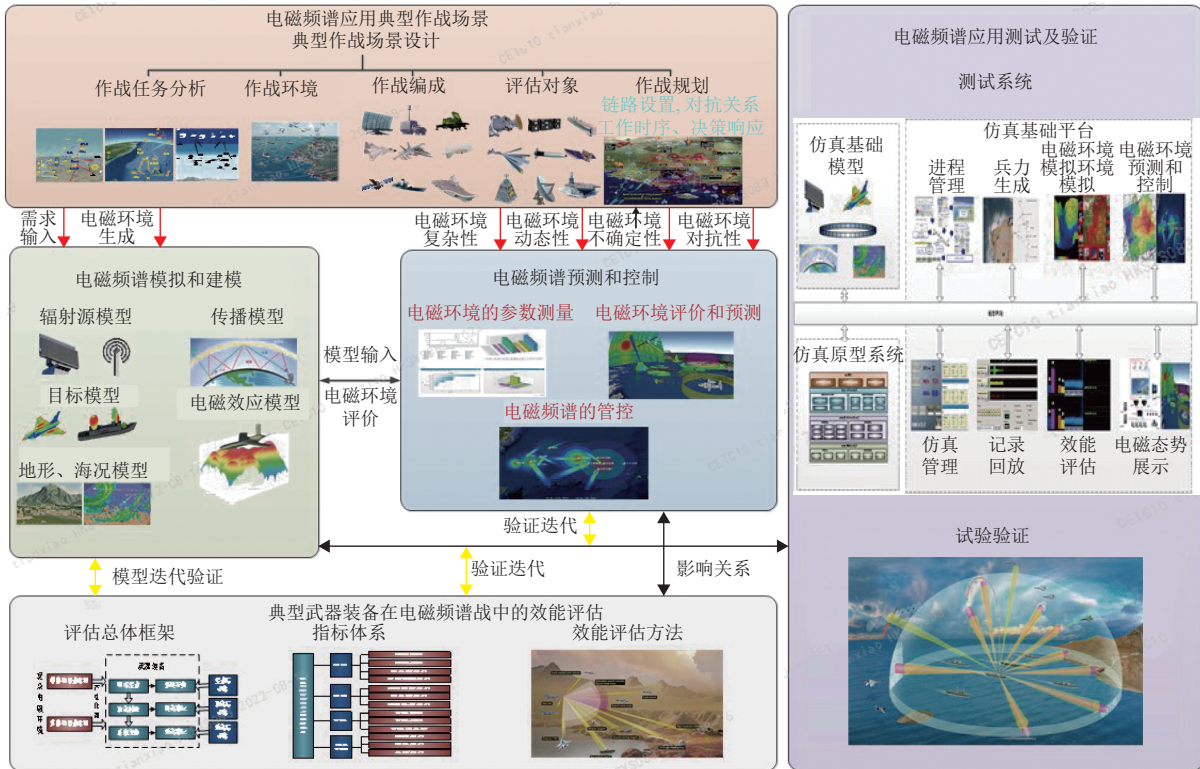


图 4 复杂战场空间电磁环境仿真与模拟

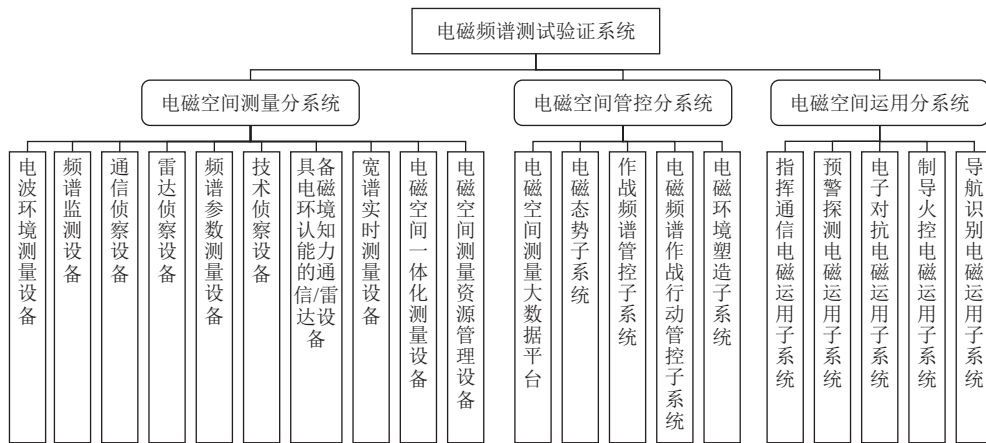


图 5 战场空间电磁频谱测试验证体系框架

4.2 工程实践方面

1) 复杂战场空间电磁环境高逼真仿真测评

针对强对抗条件下陆海空天的电磁环境表征难、精准预测难等问题，中国电科研究所电磁环境仿真团队开发了如图 7 所示的复杂战场空间电磁环境仿真系统。基于组件化的建模思路，建立作战平台模型、辐射源模型、用频设备模型、电波传播、地形/地貌/海况模型、典型作战装备的电磁效应模型，形成基础仿真模型数据库，动态生

成可配置的多粒度、多维度的复杂电磁环境，完成电磁环境的推演和计算。

该仿真系统可支撑电磁频谱规划、电磁环境的互扰分析、用频设备的布站位置选择等应用，为武器装备的对抗训练提供逼真的复杂电磁环境，为用频装备的效能评估和优化作战提供试验条件^[30]。该系统可支撑 100 km×100 km 作战区域、1 000 个辐射源、频率范围为 30 MHz~40 GHz 的大区域、多颗粒度的仿真，初始电磁态势分布 180 s，电磁计

算刷新时间小于 6 s, 其场景配置如表 1 所示。通过仿真系统配置海空典型作战场景, 完成 113 个敌

我平台、1 000 个辐射源的对抗仿真测试, 最终生成的电磁态势如图 8 所示。

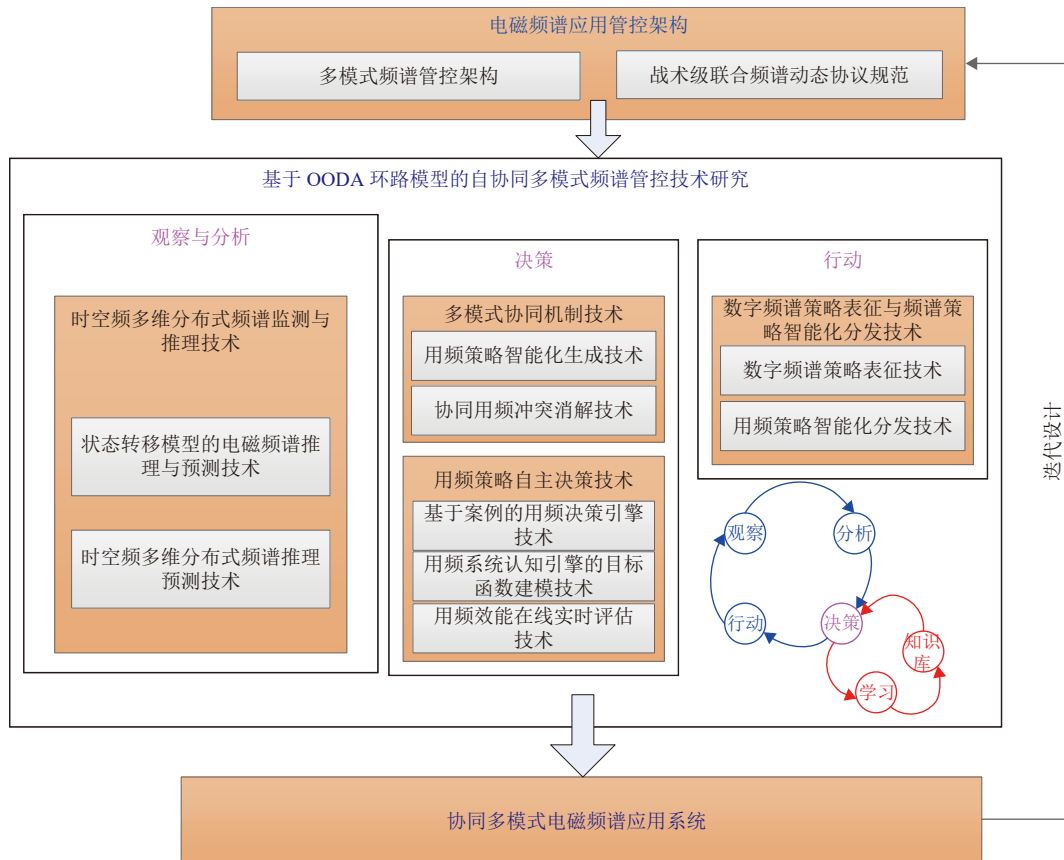


图 6 电磁频谱 OODA 闭环管控

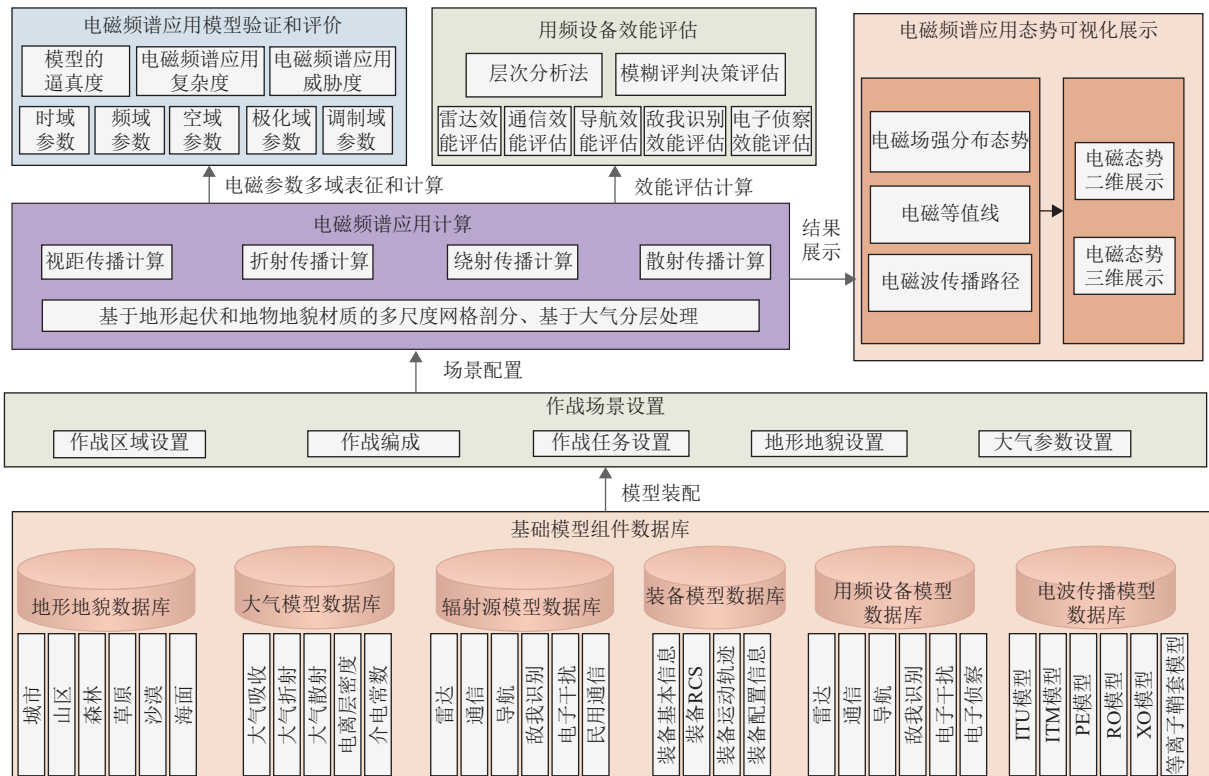


图 7 高逼真的复杂电磁环境仿真系统

表 1 复杂电磁环境场景配置

编号	装备	数量	传感器配置	天线	工作参数
1			AN/APY-9预警雷达	相控阵天线	频段: UHF~S波段 功率: 千瓦量级
2	E-2D预警机	3	UV通信	全向天线	频段: UV频段 功率: 数十瓦量级
3			Link-16	L频段天线	频段: L频段 功率: 千瓦量级
:	:	:	:	:	:
997			SPY-1D多功能雷达	相控阵天线	频段: C波段 功率: 兆瓦量级
998			SPS-64对海雷达	相控阵天线	频段: X波段 功率: 数十千瓦量级
999	阿里伯克驱逐舰	4	DSCS III卫星通信	相控阵天线	频段: UHF波段 功率: 十千瓦量级
1 000			敌我识别	L频段天线	频段: L波段 功率: 千瓦量级

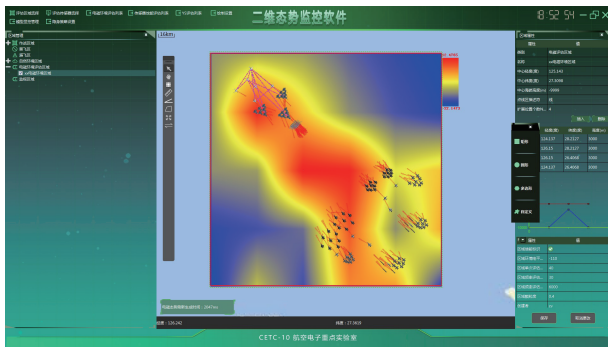


图 8 大场景多粒度的高精度电磁态势生成

2) 国产化高性能宽带监测接收机

国内一些电磁频谱监测单位相继研发出 MR3300B、SR522 等国产化高性能宽带监测接收机, 其组成框图如图 9 所示, 工作频率范围可达 20 MHz~8 GHz (可扩展至 8 kHz~26.5 GHz), 在解调灵敏度、电平误差等技术指标上已经优于 ESMD 系列接收机, 满足电磁频谱管理机构对重要区域的电磁安全保护需求。

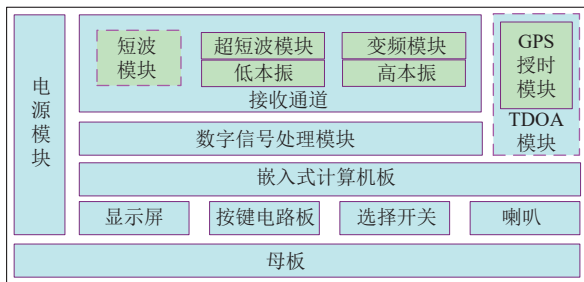


图 9 国产化高性能宽带监测接收机组成框图

3) 体系对抗条件下的电磁频谱感知与预测
电磁频谱空间感知和预测主要包含 3 个环节的

内容: 1) 通过已学习到的信号特征对感知到的信号完成统一描述生成电磁频谱空间云图; 2) 根据时频云图分层实现电磁频谱空间云图理解; 3) 根据不同用频任务生成所对应的策略^[31-32], 其整体架构如图 10 所示, 频谱空间云图生成模块主要实现异构频谱数据标准化统一表征。同时, 生成频谱空间知识, 分析频谱空间兼容状态, 对电磁频谱空间复杂度以及电磁频谱空间威胁程度进行评估, 学习频谱空间的变化规律并预测电磁频谱云图的变化趋势。

针对电磁频谱预测结果和用频业务需求, 中国电科研究所在频谱管控领域开展了体系对抗条件下的电磁频谱感知与预测研究, 构建了分布式异构平台复杂电磁环境对抗系统, 利用电磁频谱空间云图进行认知和预测, 结果如图 11 所示, 并生成最佳用频策略, 认知频段为 30 MHz~8 GHz, 用频设备数量大于 16 个, 电磁频谱认知时长小于 10 min, 在线预测时间小于 1 s。

4) 电磁频谱大数据平台

电磁频谱数据具有异构多样性、海量、高时效性、准确性和高价值等特点。为高效提取这些电磁频谱大数据的有用信息, 国内厂商相继研发出电磁频谱大数据平台, 图 12 为某电磁频谱大数据平台的逻辑框架图。这些平台可以应用于各无线电管理机构, 对 IQ 数据、信号特征、台站数据等多类型数据进行融合分析, 支持不同维度的数据分析。如基于频域、时域、空域的占用情况分析, 基于语音、轨迹、监测信息无线电业务的干扰分析。大数据提供

重点区域异常电磁信号监控、重要信号特征分析等 应用与服务, 实现电磁频谱数据挖掘与智能分析^[33-34]。

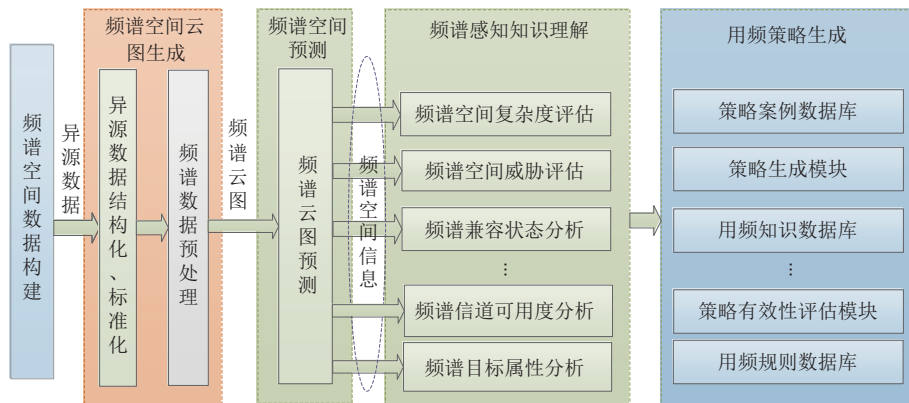


图 10 全域电磁频谱感知与预测架构

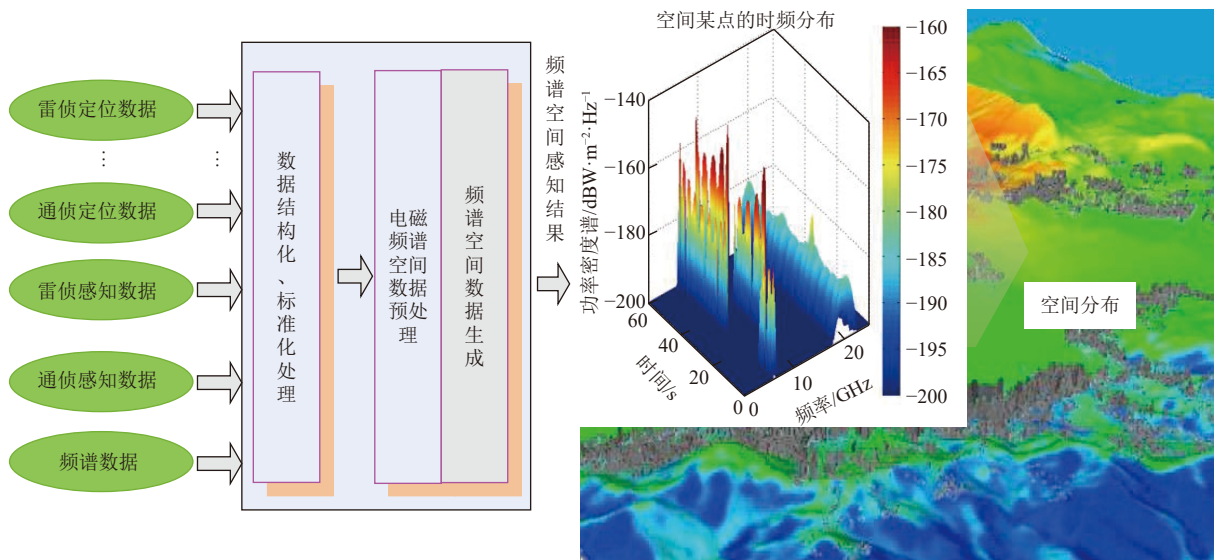


图 11 电磁频谱全域态势感知与预测结果

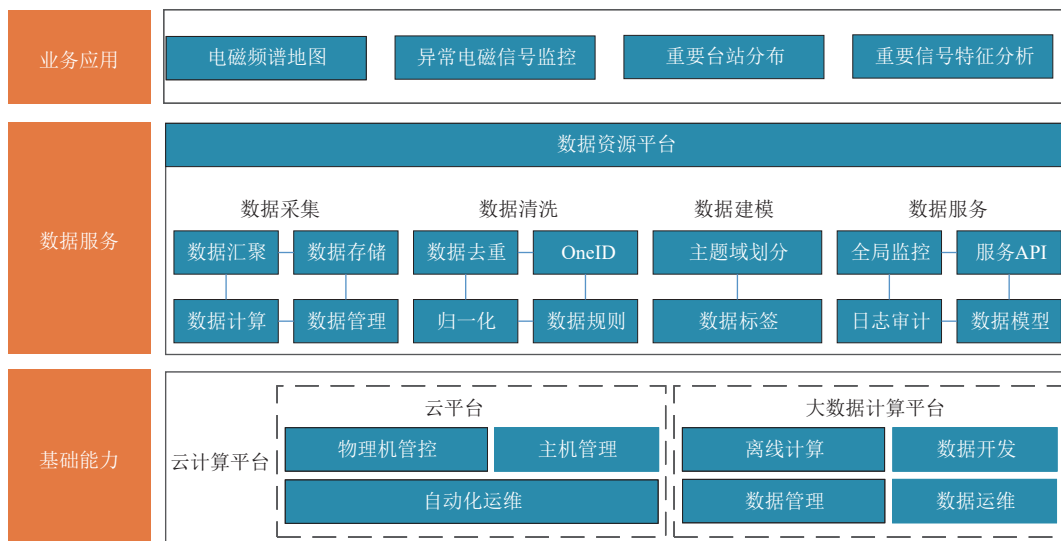


图 12 某电磁频谱大数据平台逻辑架构图

4.3 关键技术层面

针对上述电磁频谱应用的总体设计和工程应用, 需要从电磁环境高逼真实时预测、电磁信号识别分类、电磁频谱数据关联、电磁环境评价和用频设备效能评估等方面开展关键技术研究, 提升电磁频谱应用的技术成熟度和实战能力。

1) 复杂电磁环境高逼真和高实时预测技术

电磁环境仿真的逼真度和实时性是制约复杂电磁环境工程应用的瓶颈短板, 不规则地形和非均匀大气的电波传播的精确预测难度更大。国内相关研究所经过十余年技术攻关, 从影响电波传播效应的环境因素(地形、地貌等)出发, 建立了包括云、雨、雾、雪、沙尘等在内的各类对电波传播有影响的模型, 如图 13 所示。采用经验模型+半经验半确定性模型方法, 构建出相应场景下的电波传播模型。综合考虑计算效率和计算精度这两个因素, 根据传播环境特点匹配适当的传播模型, 根据动态仿真过程中的实时链路环境, 自动匹配传播模型。利用辐射源分割优化、地形剖分优化、GPU 并行计算等技术进行电磁环境并行加速计算^[35-36]。

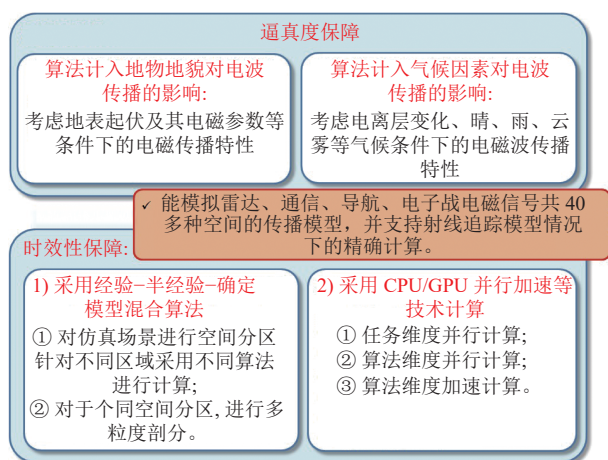


图 13 复杂电磁环境高逼真和高实时预测

2) 多体制多目标识别分类技术

电磁频谱采集的重要目的就是建立电磁目标的属性数据库, 其中的首要环节就是对电磁目标进行分类识别, 对重点信号进行信号特征提取。通过对信号波形、通信协议进行分析, 并与信号特征数据库进行匹配, 来实现信号目标类型的识别。针对卫星信号频段等复杂电磁环境, 采用全数字信道化方法, 采集后再处理或者采集后离线处理, 实现多体制多目标识别分类, 解决复杂环境对信号特征的衰落影响, 实现对目标信号的分析 and 稳定识别^[37]。

3) 时空频多维分布式频谱监测与预测技术

战场中的海量频谱采集和监测数据必须要经过处理才能形成支撑作战使用的情报数据, 采用隐马尔可夫模型 (Hidden Markov Model, HMM) 对装备用频行为进行建模, 通过观测数据获得模型参数, 所获得的参数用于用频设备的用频行为监测与预测学习。在用频策略生成过程中, 根据平台对感知的电磁环境信息以及历史电磁环境信息进行分析, 采用隐马尔可夫模型建模用频设备的用频行为, 将各个用频设备感知到的电磁频谱数据送入长短期记忆网络预测模型 (Long-Short Term Memory, LSTM) 网络中, 通过 LSTM 网络决定哪些频谱状态需要从单元状态中抛弃, 哪些频谱状态需要继续保留发展。基于张量自回归和深度学习的电磁频谱态势预测技术, 实现对平台所处区域的多维电磁频谱感知与预测^[38]。

4) 多源异构电磁频谱数据关联分析技术

战场中多源异构电磁频谱数据必须进行关联分析, 才能找出客观规律和变化趋势。多源异构电磁频谱数据关联分析技术可以从时间维度、拓扑关联关系等维度支撑更高层的作战应用。基于该技术, 可建立电磁频谱大数据平台统一编码规则及数据之间的关联关系描述, 抽取 IQ 数据、频谱数据、定位数据、信号特征、占用度数据、频率数据、台站数据等多类型数据, 支持对电磁频谱数据有效存储、索引及追溯, 以及面向电磁大数据分析应用主题的数据组织^[39]。从电子目标与平台目标之间多种相互关系着手, 利用编组活动频繁集, 电磁参数模式配合分析和编队协同活动分析方法, 挖掘目标协同关系以及与重大事件潜在的相关变化情况。

5) 卫星互联网监测与反制应用技术

卫星互联网监测与反制属于电磁频谱领域一个新的应用方向。随着国外“星链”系统的持续部署和全球覆盖, “星链”系统对民用和军用频谱作战威胁越来越大, 对“星链”系统的监测和反制日益迫切。卫星互联网监测与反制应用技术的初步规划是按照信号捕获、监测及压制能力提升、大数据分析及应用三大步骤, 提供发现、解决、预警预测等能力。然而, 如何快速捕获“星链”系统下行信号、快速定位“星链”终端等, 相关技术还需在实践中进行攻克。

6) 多层级的复杂电磁环境评价方法

电磁环境的评价有多个维度, 其中从“客观电磁环境”的角度量化性地评估整体宏观复杂性, 是

电磁环境最重要的评价方法, 将电磁环境复杂度分为 I 到 IV 级, 如表 2 所示。该方法采用了基于“四域特征”的复杂电磁环境基本评估指标, 建立电磁环境各要素的评价动态模型, 即用 $F_0(t)$ 、 $T_0(t)$ 、 $S_0(t)$ 、 $M_0(t)$ 、 $P_0(t)$ 来动态描述频域、时域、空域、调制域以及极化域等各参量随时间的变化过程。

表 2 电磁环境复杂度评价

战场电磁环境复杂度	复杂度评价
I级 (简单电磁环境)	$0 \leq \sqrt[4]{F_0(t)T_0(t)S_0(t)M_0(t)P_0(t)} \leq 10\%$
II级 (轻度复杂电磁环境)	$10\% \leq \sqrt[4]{F_0(t)T_0(t)S_0(t)M_0(t)P_0(t)} \leq 40\%$
III级 (中度复杂电磁环境)	$40\% \leq \sqrt[4]{F_0(t)T_0(t)S_0(t)M_0(t)P_0(t)} \leq 70\%$
IV级 (重度复杂电磁环境)	$70\% \leq \sqrt[4]{F_0(t)T_0(t)S_0(t)M_0(t)P_0(t)} \leq 100\%$

电磁环境评价也与敌方威胁对象密不可分, 考虑敌方威胁对象威胁度的评估更是贴近实战应用的电磁环境主观评估方法, 需建立基于“四域特征”相关度的电磁环境威胁度评估指标, 即: 时域相关度、频域相关度、空间相关度、能域相关度, 如图 14 所示^[40]。

7) 用频装备在复杂电磁环境中的效能评估

技术

复杂电磁环境条件下装备对抗具有整体动态演化性和不确定性等特点, 评估复杂电磁环境对装备作战效能的影响是一重大难题。从用频设备的信息获取完整性、信息获取准确性、信息获取时效性等方面, 构建如图 15 所示的雷达、通信、导航等用频设备电磁环境效能评估指标体系, 对评估指标体系中底层指标值采用模糊隶属度函数解析等评估方法, 确定相应指标的隶属度函数, 用模糊数学方法对不同复杂电磁环境等级条件下的用频设备进行效能评估^[41]。

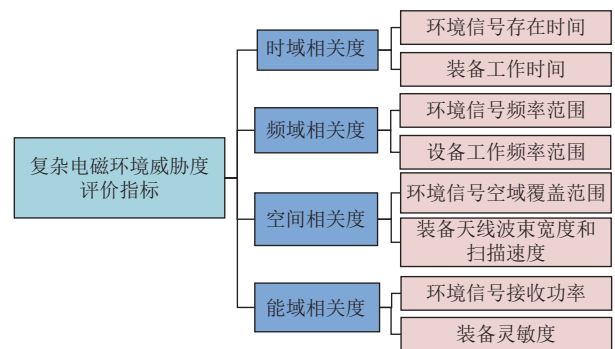


图 14 基于“四域特征”相关度电磁环境威胁度评价

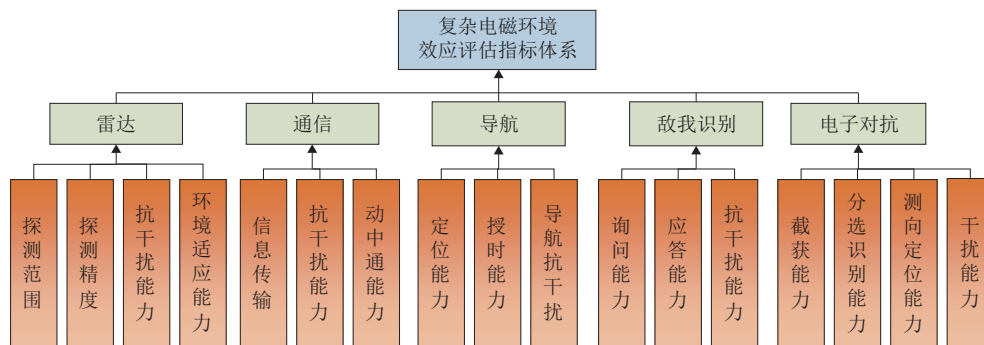


图 15 基于模糊综合评判的用频设备效能评估指标体系

5 结束语

经过多年建设, 我国在电磁频谱的感知、管控、应用与评估的理论体系、关键技术、装备研制及工程实践方面取得较大进展。结合电磁频谱总体设计和规划、电磁频谱超宽带监测、电磁频谱认知及管控、电磁频谱信息系统建设的现状及发展趋势, 有以下几点思考。

1) 加强电磁频谱感知与管控的总体设计和规划。从国家安全战略角度出发, 着眼全局, 统筹兼顾, 围绕电磁频谱应用、分发、传输、评估、数据及信息共享、管控等方面强化顶层设计, 通过高层组织、多部门协调推进电磁频谱应用与管理工作;

制定军用、民用用频装备的顶层规范和要求。

2) 以“平台+应用”思路不断提高民用电磁频谱监管专业水平。扩展全国频谱监测网络, 对监测数据进行整合, 突破多源异构电磁频谱数据关联分析等技术, 不断完善电磁频谱大数据平台, 更好地服务通信、民航、铁路、水上、安保等行业, 针对快速发展的卫星互联网等新应用, 不断提升所需的频谱监测能力, 并在电磁频谱大数据平台基础上开发出智能化应用, 提升无线电频谱安全保障水平。

3) 大力推进应对复杂电磁环境实战的频谱应用、管控关键技术突破和重点装备建设。在电磁频谱环境仿真与动态模拟、战场电磁频谱测试、电磁

兼容与协同、自适应频谱控制、电磁频谱数据共享与协作、电磁频谱辅助决策等关键技术方面,研制适用于不同平台的电磁频率测量、分析、评估与管控的智能化、综合化系列装备,提升装备应对复杂电磁环境的实战能力。

4) 加强军用电磁频谱管控信息的系统建设。围绕作战任务、阶段,做好不同军兵种间的协同,纳入联合电磁频谱作战管理条例,构建覆盖作战区域的频率应用与管控信息系统,形成电磁频谱智能化 OODA 闭环管控,为各级部队掌握战场电磁态势,解决电磁频谱干扰、实施战略、战术指挥决策提供可靠依据。同时,做好军地间用频协同,军民结合,寓军于民。

参考文献

- [1] 丁国如,孙佳琛,王海超,等.复杂电磁环境下频谱智能管控技术探讨[J].航空学报,2021,42(4):524750.
DING G R, SUN J C, WANG H C, et al. Discussion on technologies of intelligent spectrum management and control under complex electromagnetic environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524750.
- [2] 乔柳源,邱钊洋.基于认知无线电技术的电磁频谱资源调度算法[J].计算机仿真,2020,37(10):407-411.
QIAO L Y, QIU Z Y. Algorithm for electromagnetic spectrum resource scheduling based on cognitive radio technology[J]. Computer Simulation, 2020, 37(10): 407-411.
- [3] JAY Y. Electromagnetic battle management[R]. [S.l.]: Strategic Command, Joint Electronic Warfare Center, 2012.
- [4] 游屈波,吴耀云,王松煜,等.对抗“低-零功率”电磁频谱战技术需求分析[J].电子信息对抗技术,2019,34(4):60-64.
YOU Q B, WU Y Y, WANG S Y, et al. Technical requirements analysis of fighting against low-to-no power electromagnetic spectrum warfare[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34(4): 60-64.
- [5] BILL C, JOHN S, ADAM M, et al. DOD's broad vision for electromagnetic battle management[J]. The Journal of Electronic Defense, 2019, 42(9): 36-41.
- [6] Department of the Army. FM3-12. Cyberspace and electronic warfare operations[R]. Washington: Department of the Army, 2017.
- [7] 张春磊,裴琴,易楷翔.美电磁频谱作战技术体系与应对策略研究[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(5):439-444.
ZHANG C L, PEI Q, YI K X. Study on the technological architecture of U. S electromagnetic spectrum operations and countermeasures[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(5): 439-444.
- [8] 周福辉,张子彤,丁锐,等.电磁频谱空间射频机器学习及其应用综述[J].数据采集与处理,2022,37(6):1179-1197.
ZHOU F H, ZHANG Z T, DING R, et al. Survey on theory and applications of radio frequency machine learning for electromagnetic spectrum space[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2022, 37(6): 1179-1197.
- [9] RICCIARDI S, SOUQUE C. Modern electromagnetic spectrum battlefield[J]. PRISM, 2021, 9(3): 122-139.
- [10] CLARK B, GUNZINGER M. Winning the airwaves: Regaining America's dominance in the electromagnetic spectrum[R]. Washington: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2015.
- [11] CLARK B, GUNZINGER M, SLOMAN J. Winning in the gray zone—using electromagnetic warfare to regain escalation dominance[R]. Washington: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2017.
- [12] CLARK B, MCNAMARA W M, WALTON T A. Winning the invisible wargaining an enduring U. S. advantage in the electromagnetic spectrum[R]. Washington: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2019.
- [13] 张宁,周正廉,张祖尧.美军全球电磁频谱信息系统发展现状与趋势[J].电讯技术,2021,61(6):780-784.
ZHANG N, ZHOU Z L, ZHANG Z Y. Developing progress and trends of U. S. global electromagnetic spectrum information system (GEMSIS)[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(6): 780-784.
- [14] 夏海洋,查淞,黄纪军,等.电磁频谱地图构建方法研究综述及展望[J].电波科学学报,2020,35(4):445-456.
XIA H Y, ZHA S, HUANG J B, et al. Survey on the construction methods of spectrum map[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(4): 445-456.
- [15] Joint Chief of Staff (JCS). Joint electromagnetic spectrum management operations in the electromagnetic operational environment[R]. Washington: JCS, 2019.
- [16] Defense Information System Agency (DISA). Joint spectrum center (JSC) overview brief[R]. Washington: DISA, 2019.
- [17] 姜福涛,赵禄达.美军电磁频谱战发展及现状[J].航天电子对抗,2021(4):60-64.
JIANG F T, ZHAO L D. Development and current situation of US military electromagnetic spectrum warfare[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021(4): 60-64.
- [18] US Joint Chiefs of Staff. DOD Dictionary of military and associated terms[EB/OL]. [2022-6-28]. [http://bits.de/NRANEU/others/jp-doctrine/DoD-dictionary\(7-17\).pdf](http://bits.de/NRANEU/others/jp-doctrine/DoD-dictionary(7-17).pdf).
- [19] 李硕,李祯静,朱松,等.美军电磁频谱战发展分析及启示[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(8):721-724.
LI S, LI Z J, ZHU S, et al. Development analysis and enlightenment of US army's electromagnetic spectrum warfare[J]. Journal of CAEIT, 2020, 15(8): 721-724.
- [20] 周博,马欣怡,况婷妍,等.电磁频谱空间态势认知新范式:频谱语义和频谱行为[J].数据采集与处理,2022,37(6):1198-1207.
ZHOU B, MA X Y, KUANG T Y, et al. New paradigm of electromagnetic spectrum space situation cognition: Spectrum semantic and spectrum behavior[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(6): 1198-1207.

- [21] 陈勇, 张余, 柳永祥. 电磁频谱战发展剖析与思考[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4: 319-324.
CHEN Y, ZHANG Y, LIU Y X. Analysis and thinking on the development of electromagnetic spectrum warfare[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4: 319-324.
- [22] 刘培国, 黄继军, 刘继斌, 等. 信息化条件下的军事电磁频谱管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
LIU P G, HUANG J J, LIU J B, et al. Military electromagnetic spectrum management under information condition[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [23] 张澎, 张成, 管洋阳, 等. 关于电磁频谱作战的思考[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 87-98.
ZHANG P, ZHANG C, GUAN Y Y, et al. Views on electromagnetic spectrum operation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 87-98.
- [24] 王沙飞. 人工智能与电磁频谱战[J]. 网信军民融合, 2018, 2(1): 20-22.
WANG S F. Artificial intelligence and electromagnetic spectrum warfare[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2018, 2(1): 20-22.
- [25] 沈锋, 丁国如, 李婕, 等. 电磁频谱多维态势压缩测绘技术研究进展[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 25-42.
SHEN F, DING G, LI J, et al. Research progress on electromagnetic spectrum multidimensional situation compressed mapping technology[J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 25-42.
- [26] WANG Z, ZHANG L Y, KONG Q, et al. Fast construction of the radio map based on the improved low-rank matrix completion and recovery method for an indoor positioning system[J]. Journal of Sensors, 2021, DOI: 10.1155/2021/2017208.
- [27] 李泓余, 沈锋, 韩路, 等. 一种模型和数据混合驱动下的电磁频谱态势测绘方法[J]. 数据采集与处理, 2022, 37(2): 321-335.
LI H Y, SHEN F, HAN L, et al. A method of electromagnetic spectrum situation mapping driven by model and data[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(2): 321-335.
- [28] 汪莉莉, 王平, 黄傲林, 等. 战场电磁环境下的电磁频谱管控指标体系研究[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(5): 14-16.
WANG L L, WANG P, HUANG A L, et al. Research on electromagnetic spectrum management indexes system in the battlefield electromagnetic environment[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2014, 29(5): 14-16.
- [29] 孙佳琛, 王金龙, 丁国如, 等. 频谱知识图谱: 面向未来频谱管理的智能引擎[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 1-12.
SUN J C, WANG J L, DING G R, et al. Spectrum knowledge graph: An intelligent engine facing future spectrum management[J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 1-12.
- [30] ZHANG Y P, ZHAO Z J. Limited data spectrum sensing based on semi-supervised deep neural network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 166423-166435.
- [31] 李永志, 金芳. 基于海量频谱数据的电磁环境信息挖掘技术研究[J]. 无线通信技术, 2021, 30(1): 58-61.
LI Y Z, JIN F. Research on electromagnetic environment information mining technology based on mass spectrum data[J]. Wireless Communication Technology, 2021, 30(1): 58-61.
- [32] WANG J, ZHU Q, LIN Z, et al. Sparse Bayesian learning-based 3D radio environment map construction-sampling optimization, scenario-dependent dictionary construction and sparse recovery[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 10(1): 80-96.
- [33] 李京华, 丁国如, 徐以涛, 等. 面向电磁频谱战的群体智能初探[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 56-63.
LI J H, DING G R, XU Y T, et al. Preliminary study on group intelligence for electromagnetic spectrum warfare[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(4): 56-63.
- [34] 吴启晖, 丁国如, 孙佳琛. 电磁频谱数据挖掘理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
WU Q H, DING G R, SUN J C. Electromagnetic spectrum data mining theories and applications[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [35] 王圆春, 肖东, 林云. 电磁频谱数据的关联规则挖掘[J]. 电波科学学报, 2022, 37(5): 802-809.
WANG Y C, XIAO D, LIN Y. Mining association rules for electromagnetic spectrum data[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(5): 802-809.
- [36] 吴启晖, 任敬. 电磁频谱空间认知新范式: 频谱态势[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 625-632.
WU Q H, REN J. New paradigm of electromagnetic spectrum space: spectrum situation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 625-632.
- [37] 杜振华, 周舒. 我国频谱资源配置的动态调整机制研究[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2020, 22(1): 14-19.
DU Z H, ZHOU S. Dynamic adjustment mechanism for spectrum resource allocation in China[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Social Sciences Edition), 2020, 22(1): 14-19.
- [38] SHEN F, DING G R, WU Q H, et al. Compressed wideband spectrum mapping in 3D spectrum-heterogeneous environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(4): 4875-4886.
- [39] XU Y Q, ZHANG B, DING G, et al. Radio environment map construction based on spatial statistics and Bayesian hierarchical model[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 767-779.
- [40] 付松. 一种基于“四域特征”的复杂电磁环境多层次评估方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(9): 1048-1054.
FU S. A multi-level evaluation method of complex electromagnetic environment based on four-domain feature[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(9): 1048-1054.
- [41] 焦逊, 岳秀清, 常凯. 装备效能评估与建模仿真技术[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(2): 7-10.
JIAO X, YUE X Q, CHANG K. Equipment effectiveness evaluation and modeling simulation technology[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(2): 7-10.