

## 论电磁空间安全

陈勇<sup>1,2</sup>,姚富强<sup>1,2</sup>,张余<sup>1,2\*</sup>

(1. 电磁空间安全试验评估全国重点实验室, 江苏南京 210007;

2. 国防科技大学第六十三研究所, 江苏南京 210007)

**摘要:**电磁空间作为贯穿传统安全与非传统安全领域的跨域作战空间,已成为国家安全博弈的战略制高点。电磁空间安全体系能力更是重塑战争形态、决定制胜权的核心变量。在梳理电磁空间安全概念的发展与演进脉络基础上,凝练其发展过程中呈现的“三维”跃升特征,提出基于多视角的电磁空间安全体系架构及内涵要义,阐述当前电磁空间安全发展和面临的技术挑战,从多个层次、有针对性地提出电磁空间安全技术体系发展建议,为捍卫电磁空间主权、维护电磁空间安全提供理论与实践参考。

**关键词:**电磁空间;电磁空间安全;电磁空间主权;制电磁权

**中图分类号:**TN99 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2026)03-001-11

## Discussion on electromagnetic space security

CHEN Yong<sup>1,2</sup>, YAO Fuqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2\*</sup>

(1. National Key Laboratory on Test and Evaluation for Electromagnetic Space Security, Nanjing 210007, China;

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

**Abstract:** As a cross-domain operational domain spanning both traditional and non-traditional security fields, electromagnetic space has become a strategic commanding height in the competition for national security. The capability of electromagnetic space security system is regarded as a core variable reshaping the pattern of warfare and determining the right to victory. The development and evolution of the concept of electromagnetic space security were systematically reviewed, and the “three-dimensional” leap characteristics displayed in its development process were summarized. A system architecture of electromagnetic space security and its essential connotations were proposed based on multiple perspectives. The current development status and technical challenges of electromagnetic space security were expounded. Some suggestions with multi-level and highly targeted were proposed for the development of the electromagnetic space security technology system. It provides theoretical and practical references for safeguarding national electromagnetic space sovereignty and electromagnetic space security.

**Keywords:** electromagnetic space; electromagnetic space security; electromagnetic space sovereignty; electromagnetic dominance

电磁空间安全是国家新兴安全领域的核心构成要素,其理论内涵与实践范畴随战争形态的迭代演进呈现动态拓展趋势。在人工智能、无人系统等前沿技术与现代战争深度耦合的时代背景下,战争形态加速向智能化演进,电磁空间已实现从传统作战保障域跃升为关键机动作战域与战略博弈空间<sup>[1]</sup>。2020年修订实施的《中华人民共和国国防法》,将电磁空间界定为新兴重大安全领域;从空间属性来看,电磁空间凭借其全域渗透性,贯通陆、海、空、天等传统物理作战域,同时与网络空间等新型安全领域深度交织,形成“全域

覆盖、跨域联动”的战略格局,成为国家战略博弈的核心制高点<sup>[2]</sup>。

近年局部冲突中电子侦察与干扰、无人系统及其对抗、电磁频谱攻防等典型作战行动案例<sup>[3-4]</sup>表明:作战全程高度依赖电磁频谱的有序运用与高效管控,制电磁权已成为夺取战场综合优势、实现作战目标的先决条件。未来智能化高端战争将呈现“智能主导、跨域融合、精确对抗、速决制胜”的核心特征<sup>[5]</sup>,电磁空间安全作为作战体系的“神经中枢”,在作战体系中的先导性与主导性作用显著增强。

收稿日期:2025-01-19

第一作者:陈勇(1975—),男,湖南衡阳人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:chy63s@126.com

\*通信作者:张余(1983—),男,四川邻水人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:zhyu63@163.com

引用格式:陈勇,姚富强,张余. 论电磁空间安全[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(3): 1-11.

**Citation:** CHEN Y, YAO F Q, ZHANG Y. Discussion on electromagnetic space security[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(3): 1-11.

当前,电磁频谱资源争夺白热化、智能攻防技术快速普及等多重复合挑战交织叠加,对电磁空间安全能力建设提出更高要求<sup>[6]</sup>,深入剖析其现实挑战与深层困境,科学构建技术体系,对抢占战略博弈制高点、捍卫国家电磁空间主权,具有长远战略和现实应用价值。

# 1 电磁空间安全概念内涵

## 1.1 概念发展

早在第一次世界大战时期,围绕电磁频谱利用与控制的对抗便已展开<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。从历史演进视角看,早期实践主要围绕电子设备防泄漏、简易电磁干扰与抗干扰展开<sup>[7-8]</sup>,核心目标是保障单一设备用频安全。海湾战争后,战场空间实现从陆、海、空、天向第五维——电磁空间的拓展<sup>[9]</sup>,电磁空间的作战价值初步凸显;2005 年,美国国防部《国防战略报告》明确将网络电磁空间

纳入国家战略框架<sup>[10]</sup>,推动其由辅助保障领域升级为重要作战域,范畴拓展至频谱管理、关键用频防护等领域,突破单一设备用频安全的局限,电磁空间安全逐步受到重视<sup>[11]</sup>;2011 年,我国明确将电磁空间安全定义为“己方各类电磁活动能够在特定的电磁空间范围内正常进行,同时秘密电磁频谱信息不被窃取的状态”,该定义以电磁活动安全和频谱信息安全为核心,以被动防护为主要导向。2020 年,美军首次将电磁频谱作战纳入术语体系<sup>[12]</sup>,我国在法律层面明确电磁空间为重大安全领域,正式确立其战略地位,电磁空间安全已发展为全域、主动、战略层面的体系化安全,涵盖主权维护、全域管控、用频设施防护、电磁活动保障和攻防对抗等内容,核心围绕电磁频谱、用频设施、电磁活动三大要素<sup>[2]</sup>,标志着电磁空间安全概念进入成熟定型阶段。

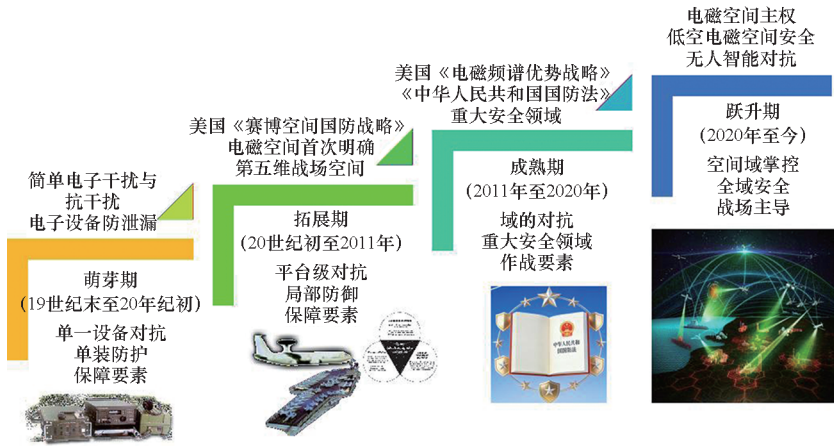


图 1 电磁空间安全概念发展历程

Fig. 1 Evolution of electromagnetic spectrum security concepts

近几场局部冲突中,电子侦察、电子干扰、无人反无人电磁对抗等实战场景,推动电磁空间安全加速迈向体系化对抗阶段;6G 通信、低空经济等新兴产业的兴起,促使电磁空间安全深度融入多域作战体系,呈现智能化发展特征。在此背景下,文献[2]提出了电磁空间主权理论,阐述电磁空间安全和电磁空间主权的法律属性与法理依据,推动其形成“感知-管控-利用-对抗”的全域体系。电磁空间主权是维护电磁空间安全的前提和依据,制电磁权是维护电磁空间安全的核心能力。

通常而言,安全问题源于威胁存在,电磁空间面临的威胁主要来自外部,因此,电磁空间安全属于国家安全范畴<sup>[2]</sup>,主要由外部威胁程度、系统自身脆弱性、防御与管控能力共同决定,是三者动

态平衡的结果。

综上,电磁空间安全概念与战争形态变革深度同步,呈现从设备级对抗升级为空间域掌控、从单装防护发展为全域安全体系、从保障要素跃升为战场主导要素的“三维”跃升特征,如图 1 所示。

## 1.2 体系架构

2011 年电磁空间安全概念已得到认可,但受技术制约,电磁空间利用不充分,相关矛盾并不突出。随着人工智能、无线电等技术迭代升级与规模化应用,频谱需求持续增长,电磁空间对抗日趋激烈,逐步成为国家安全博弈的战略制高点与重要作战域<sup>[2,13]</sup>。电磁空间安全的核心是电磁空间保持不受威胁的状态及具备应对各类威胁的能力<sup>[2]</sup>,从基于能力形成的内因、外因和外延出发,

可从基本要素、价值层级、实践活动等多视角开展分析。为此,提出多视角的电磁空间安全体系架构,以系统论、体系论为理论基础,以电磁大数据和智能计算为技术基石,构建电磁空间安全客观构成一目标导向一实现路径三者间的逻辑闭环,如图2所示。

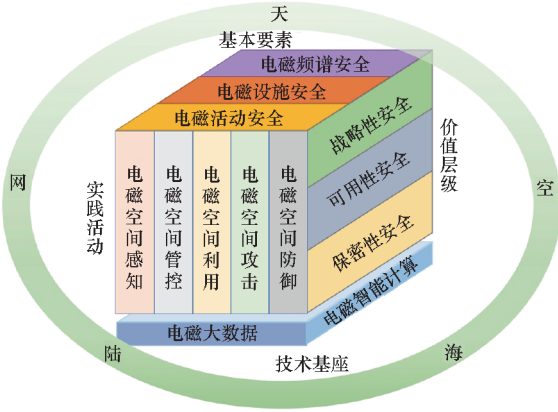


图2 电磁空间安全体系架构

Fig.2 Electromagnetic space security architecture

### 1.3 内涵要义

电磁空间安全从不同视角具有不同且相互关联的内涵。

从基本要素看,电磁空间安全核心涵盖电磁频谱安全、电磁设施安全和电磁活动安全三大要素<sup>[2]</sup>,其中:电磁频谱安全为核心,聚焦频谱资源的合法占用、有序使用与有效管控;电磁设施安全侧重电磁发射、接收、传输等核心设施的物理安全与功能可靠性;电磁活动安全旨在维护电磁活动的连续性与完整性,防范电磁干扰、欺骗、截获等威胁,保障电磁活动目标有效实现,电磁活动安全还包括电磁波生物效应安全,即关注电磁波辐射对人员身心健康的影响<sup>[14]</sup>。

从价值层级看,电磁空间安全可划分为战略性安全、可用性安全与保密性安全三个层级<sup>[15]</sup>,其中:战略性安全立足国家主权与战略利益,核心围绕制电磁权争夺,是维护国家电磁空间主权、构建战略威慑能力、参与国际战略竞争的关键支撑;可用性安全聚焦电磁活动的基础保障,要求电磁资源、设施及服务稳定运行、可靠接入,避免因干扰、故障或攻击导致的功能失效;保密性安全面向电磁信息传输与处理防护,核心是确保电磁信号所承载的信息不被非法截获、破译或篡改,防范核心情报泄露、指挥链路渗透等风险。

从实践活动看,电磁空间安全涉及电磁空间感知、管控、利用、攻击与防御等关键活动<sup>[16]</sup>。其中:电磁空间感知聚焦电磁环境的实时监测、态势

分析与情报获取,为指挥决策与作战行动提供精准支撑;电磁空间管控包括频谱管控、设施监管、违规处置及行动管控等,旨在维护电磁空间整体运行秩序;电磁空间利用指依托电磁频谱与设施合法开展通信、导航、探测等电磁活动;电磁空间攻击是以瘫痪敌方电磁系统、维护己方频谱使用为目标的主动行为;电磁空间防御是应对各类电磁威胁实施的综合防护行动。

从技术基座看,电磁大数据实现全域电磁信号、频谱资源、电磁活动、电磁环境等多源异构、多模异质数据的汇聚、清洗、存储与关联分析;电磁智能计算依托人工智能、大模型、云计算、数字孪生等技术,实现电磁态势快速生成、频谱资源动态优化、攻防策略自主生成,是支撑体系高效运行、智能响应的核心引擎。

因此,广义上电磁空间安全涵盖电磁空间感知、管控、利用、攻击和防御等活动涉及的安全问题;狭义上电磁空间安全,是从受影响者身份来探讨安全问题,主要包括电磁空间管控和防御活动。

## 2 电磁空间安全发展现状

当前,电磁空间安全领域在战略规划、技术发展、力量布局及实践运用等方面,均呈现稳步发展、紧贴实战的态势。

### 2.1 战略规划

世界主要军事强国已将电磁空间安全提升至国家安全战略高度,明确其贯穿陆、海、空、天多域的重要作战域属性。美军率先确立电磁频谱的作战域定位,引领全球电磁频谱作战发展,并持续更新战略条令,如2019年7月美空军发布附录3-51《电磁战与电磁频谱作战》<sup>[17]</sup>、2020年7月美军发布JP 3-85《联合电磁频谱作战》<sup>[18]</sup>、2020年10月美国国防部发布《电磁频谱优势战略》<sup>[19]</sup>、2021年8月美国陆军发布新版FM 3-12《网络空间与电磁战》<sup>[20]</sup>,对国际军事格局产生深刻影响;美军以《电磁频谱优势战略》为牵引,统筹推进电磁频谱作战各要素高效协同,全力夺取全域电磁频谱优势。俄罗斯将电磁空间视为应对外部安全威胁的关键领域,出台专项战略明确作战理论与发展路径,将夺取电磁频谱优势作为维护国家安全的核心目标<sup>[21-22]</sup>。2020年版《中华人民共和国国防法》正式将电磁空间安全纳入国家安全体系,引发广泛关注。随着电磁空间主权理论的提出,维护电磁空间安全的法理依据、责任主体、应对措施等进一步被明确。

### 2.2 技术发展

电磁空间安全技术已形成“感知、管控、利用、攻击、防御”五大方向,从单一功能突破向体系化智能协同加速发展,呈现智能化、体系化、分布式、跨域融合特征,如图 3 所示。电磁空间感知聚焦感知高精度、智能化、一体化发展,构建多域协同感知理论与架构<sup>[23]</sup>和 AI 驱动的频谱认知理论<sup>[24-25]</sup>,突破信号智能分选<sup>[26]</sup>、辐射源识别<sup>[27]</sup>、电磁频谱大模型<sup>[28-29]</sup>、协同频谱感知<sup>[30]</sup>、智能频谱感知<sup>[31-32]</sup>、智能威胁预警与意图识别<sup>[33]</sup>等技术,并在里德堡原子<sup>[34]</sup>和量子传感<sup>[35]</sup>等前沿方向取得进展,呈现由单点监测向全域认知、由单维处理向多维融合的发展趋势;电磁空间管控主要围绕电磁空间行动与资源筹划、资源高效配置和作战行动协同,建立数智赋能的电磁环境模拟和跨域频谱协同机制,突破基于多智能体强化学习的任务筹划<sup>[36]</sup>、任务驱动的频谱筹划<sup>[37]</sup>、智能频谱共享<sup>[38-40]</sup>和频谱分布式决策<sup>[41]</sup>等技术,以及轻量化电磁频谱模型<sup>[42]</sup>,呈现由静态计划分配向动态智能筹划、在线管控的发展趋势;电磁空间利用主要聚焦电磁频谱高效利用、电磁信息可靠传输和电磁能量精确赋能等,突破通感一体化<sup>[43]</sup>、高功率微波<sup>[44]</sup>等理论与技术,整体向智能化、高效率方向发展;电磁空间攻击主要以认知智能干扰、软硬一体毁伤和精确制导突防为核心,实现对敌方电磁感知与利用的精准压制、瘫痪与摧毁,建立认知电子干扰<sup>[45]</sup>、分布式干扰<sup>[46]</sup>、跨域协同干扰、基于软件定义相控阵等理论,突破干扰波形智能生成、基于群体智能的蜂群干扰策略、高功率微波武器<sup>[44]</sup>、高能激光摧毁和多模复合制导等技术,向精准化、分布式、一体化方向发展;电磁空间防御主要聚焦主动自适应防护、频谱参数泄漏管控等<sup>[47]</sup>,构建多层次、全方位、智能化的电磁空间防御技术体系,突破盲源分离<sup>[48]</sup>、自适应波束成型<sup>[49]</sup>、智能抗干扰决策<sup>[50]</sup>、智能电磁隐身<sup>[51]</sup>、射

频指纹和高性能电磁屏蔽材料<sup>[52]</sup>等技术,创新内生抗干扰<sup>[53-54]</sup>理论。美军在认知电子战<sup>[55]</sup>、人工智能驱动电磁频谱作战<sup>[56]</sup>、高功率微波武器<sup>[57]</sup>等前沿方向处于全球领先地位;俄军的高功率脉冲武器<sup>[57]</sup>已形成实战部署能力,呈现由被动防护向主动自适应、内生抗干扰、智能隐身方向的发展趋势。

### 2.3 力量布局

军事强国已构建规模化、专业化的电磁空间安全力量体系。如:美军从国防部、参联会、各军种至一级司令部构建全层级电磁频谱作战指挥机构,注重电磁频谱作战力量与传统作战力量的优化整合,建立以联合电磁频谱作战中心(如图 4 所示)<sup>[18,50]</sup>为核心的组织架构,组建专业化的联合电磁频谱作战部队,整合各军种频谱管理与电子战力量,形成“感知、管控、利用、攻击、防御”一体化作战能力,2021 年 6 月美国空军组建第 350 频谱战队<sup>[59]</sup>,2023 年 7 月美国战略司令部成立联合电磁频谱作战中心<sup>[60]</sup>。俄军构建了陆、海、空、天多位一体的电磁空间作战力量布局,列装“克拉苏哈-4”机动电磁战系统、“摩尔曼斯克-BN”远程干扰机等先进装备<sup>[61]</sup>。

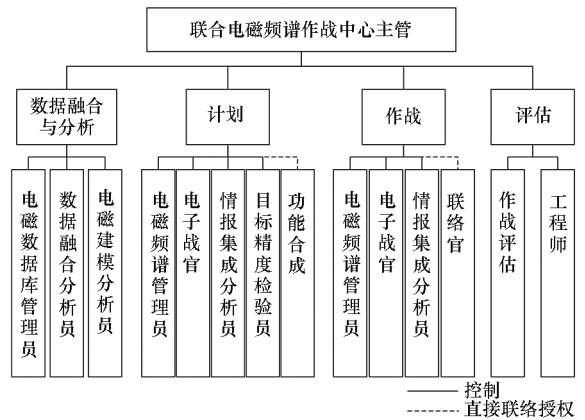


图 4 美军联合电磁频谱作战中心组织架构

Fig.4 Organization structure of the U. S. Military's Joint Electromagnetic Spectrum Operations Center

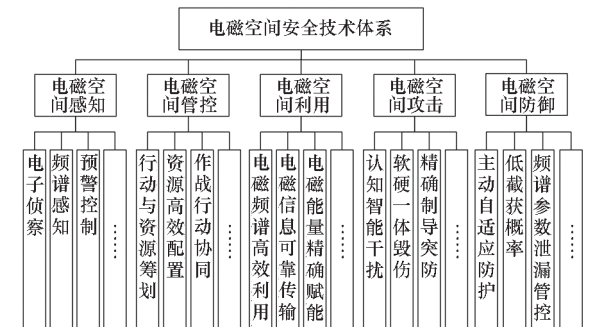


图 3 电磁空间安全技术体系

Fig.3 Technology system of electromagnetic space security

### 2.4 实践运用

电磁空间安全能力在近期多场局部冲突中得到充分实验验证。美军大力推动电磁频谱作战融入全域联合作战实践,在多场军事行动中展现出成熟的能力体系。如:2025 年“午夜之锤”行动中,美军 B-2 轰炸机采用电磁静默管控、低功率通信等电磁频谱精确管控手段,实现信号特征隐匿与突防<sup>[62]</sup>,这充分体现了电磁空间安全管控与防护能力对作战行动的直接支撑作用。俄军通过

电磁战手段锁定乌军阵地、干扰 GPS 与通信系统,实现对其作战体系的瘫痪打击;乌军探索形成电磁防御与反击的创新战法,双方展开快速迭代的电磁对抗<sup>[63]</sup>。此外,美军为本土及海外军事基地的通信枢纽、核设施等关键目标构建全流程电磁空间安全保障体系,推动电磁空间安全技术向新兴军事与民用领域深度渗透,如星链卫星搭载自适应频谱调整技术<sup>[64]</sup>,通过星间频谱动态分配,降低与地面基地的电磁干扰,为美军海外行动

提供抗干扰通信服务。为无人机配备小型化电磁静默模块与抗干扰通信设备,使其具备复杂电磁环境下侦察任务执行能力。

### 3 电磁空间安全面临的技术挑战

电磁空间安全能力是通过电磁空间感知、管控、利用、攻击和防御等活动来体现<sup>[16]</sup>,如图5所示。为精准把握电磁空间安全能力生成的核心矛盾,需要破解其发展过程中面临的技术挑战。

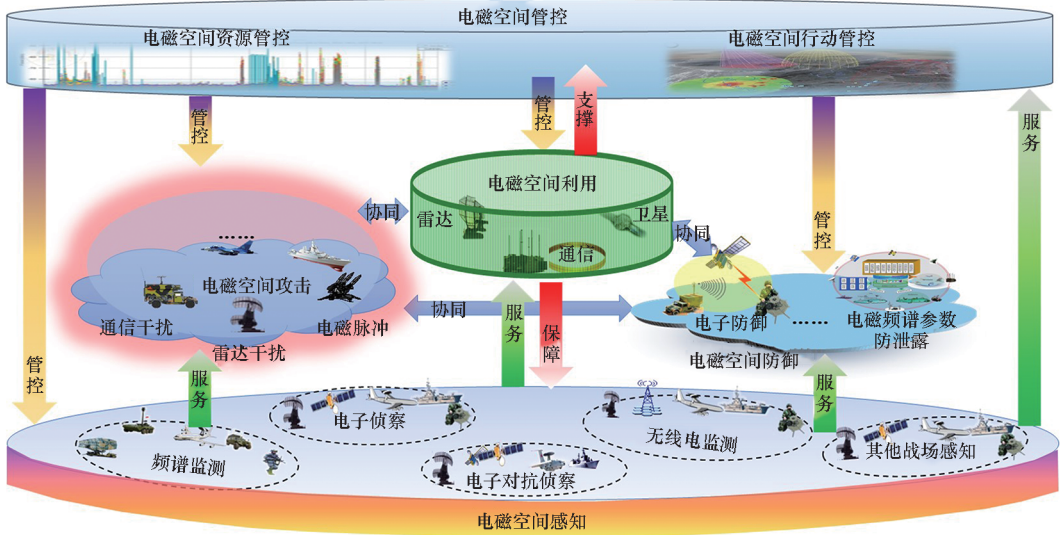


图5 电磁空间安全活动构成

Fig. 5 Components of electromagnetic space security activities

#### 3.1 电磁空间感知

电磁空间感知是维护电磁空间安全的基础,当前面临全维度覆盖、弱信号检测、实时处理等关键技术瓶颈。在信号环境层面,现代战场及民用领域电磁信号构成复杂,既包括通信导航、广播信号等合法电磁辐射,也涵盖工业、交通等集合无意电磁辐射,还包括电磁干扰、电磁脉冲等恶意电磁辐射<sup>[65]</sup>,信号呈现异构、动态、密集、交错、种类繁多等特征,传统感知手段覆盖 100 kHz ~ 50 GHz 频段,海上、空中和天基感知手段弱,难以实现全频段、全时域、全空域覆盖,难以精确捕获信号特征<sup>[66]</sup>;在感知环境层面,复杂地物地貌导致电磁信号遮挡、反射,形成电磁空间感知盲区,对低功率、跳频、直扩等特殊信号的探测难度大;在信号处理层面,非合作电磁信号故意伪装,大幅降低了信号识别与属性判定的准确率<sup>[67]</sup>,在单个未知电磁信号前提下,识别准确率为 80% 左右。同时,海量电磁信号数据采集、传输、处理需消耗大量算力,现有算法的运算效率难以满足电磁态势实时融合与威胁精准研判,导

致电磁空间感知能力滞后于电磁环境动态变化。

#### 3.2 电磁空间管控

电磁空间管控是维护电磁空间安全的核心支撑,当前面临国际频域博弈、跨域协同、动态适配等技术瓶颈。从国际博弈层面看,电磁信号传播具有无国界特征,频谱资源呈现全球共享共用属性,6 GHz 以下优质可用频谱资源已基本划分完毕,世界各国在采用动态频谱技术解决 6 GHz 以下频段利用率不高的同时,加大了国际资源争夺,频谱资源国际争夺更趋激烈,其战略性安全维护难度显著提升<sup>[68]</sup>;从跨域协同层面看,现代战争及民用领域中,频谱筹划与频谱行动的融合深度不足,任务需求与资源配置的统筹力度不够,联合作战区域内陆、海、空、天等多域频谱协同机制尚不健全;从动态适配层面看,面对频谱使用场景电磁对抗激烈、电磁环境瞬变、高动态、高密度等特征,频谱需求实时波动,如侦察无人机在起飞、着陆、巡航等过程中仅需传输测控信息,用频需求不超过 1 MHz,而在任务阶段需要传输载荷数据,频谱需求可到几十 MHz,静态管控无法满足,但动

态管控在实时性和精确性等方面仍存在明显短板<sup>[68-69]</sup>。

### 3.3 电磁空间利用

电磁空间利用是维护电磁空间安全的核心目标,其关键是电磁频谱利用,当前面临着中低频资源枯竭、高频段技术壁垒、新兴场景需求爆发等瓶颈。虽然国际电信联盟划分的电磁频谱覆盖了 0.03 Hz ~ 3 000 GHz<sup>[70]</sup>,频谱资源理论上非常丰富,但受技术成熟度约束,毫米波等高频段存在技术壁垒高、商用成本昂贵等问题,导致高频段频谱资源开发利用不充分,300 GHz 以上频段还未划分,中低频可用频谱资源日趋稀缺<sup>[68]</sup>。随着 6G 通信、无人智能、低空智联网、低轨卫星星座等新兴技术的快速迭代与规模化应用,军民领域频谱需求急剧增长。据统计,到 2031 年,全球物联网设备连接数量高达 350 亿,全球移动流量将高达 482 EB/月<sup>[71]</sup>,如何实现频谱资源的高效、灵活、自主使用,已成为电磁空间安全领域的核心技术挑战。虽然多址接入<sup>[72]</sup>、轨道角动量技术<sup>[73]</sup>、同频双全工技术<sup>[74]</sup>等频谱高效利用技术在一定程度上能够缓解频谱资源紧缺困境,但仍然跟不上频谱需求爆炸式增长速度,难以适配多样化应用场景需求。同时,正是由于频谱需求急剧增长,频谱冲突和无用发射造成电磁环境恶化,电磁环境噪声电平已从 10 年前的 -140 dBm/Hz 上升至 -125 dBm/Hz,不仅影响用频系统性能,反过来又限制了电磁空间的利用<sup>[14]</sup>。

### 3.4 电磁空间攻击

电磁空间攻击是维护电磁空间安全的主动制衡手段,当前主要面临精准攻击、攻击隐蔽性与可控性平衡等技术瓶颈。随着人工智能技术的发展及深度应用,敌智能抗干扰、分布式抗干扰、反高功率微波武器等能力得到快速提升<sup>[45,50,57]</sup>,传统窄带干扰、定向压制干扰和自适应干扰等手段的效能显著下降,难以实现对敌指挥、通信、雷达等核心系统的精准干扰。同时,电磁空间攻击会向外辐射较大信号功率、覆盖较大区域,极易暴露己方位置,被敌方侦察定位;且现有功率控制技术的精度不足,难以实现“精确打击、快速撤离”的战术目标,攻击行动的可控性与安全性难以保障。

### 3.5 电磁空间防御

电磁空间防御是应对敌方电磁空间威胁的核心能力,当前面临着主动防御不足、体系防护薄

弱、民用设施脆弱等难题。从装备防护层面看,现有雷达站、通信基站和计算机终端等电子设备对电磁脉冲的防护能力薄弱,核心芯片、电路板等关键部件易受电磁辐射影响而失效<sup>[75]</sup>;5G 基站、电力网等民用基础设施的电磁防护水平较低,可能成为电磁空间攻击的重点<sup>[76]</sup>;指挥所、导弹发射阵地等关键目标的电磁设备虽配备基础防护措施,但针对大功率宽带压制干扰、高功率电磁脉冲等电磁空间攻击的有效防护技术更新滞后,防护效能有限。从信号防御层面看,以屏蔽、抗干扰、静默等传统被动防御为主的防御手段,难以提前预判敌方攻击意图,无法有效对抗敌方智能化、分布式电磁干扰和高功率电磁脉冲攻击。从体系协同层面看,对敌电磁攻击源的精确定位与反制能力不足,对电磁欺骗信号的实时识别与修正能力薄弱,且电磁空间防御体系化建设不完善,整体防御效能受限。

## 4 电磁空间安全技术体系建设举措建议

电磁空间安全虽已受到国家高度重视,但相关能力建设还急需加快推进。建议从基础理论探索、关键技术攻关、交叉融合创新、技术应用落地、技术支撑基石等维度协同推进,构建全域覆盖、动态适配、攻防一体的电磁空间安全技术体系,如图 6 所示。



图 6 电磁空间安全技术体系建设举措

Fig. 6 Measures for the construction of electromagnetic space security technology system

### 4.1 夯实电磁空间安全基础理论

结合电磁空间对抗性、隐蔽性、复杂性的领域特殊性,紧扣核心能力生成需求,补齐理论短板、强化源头供给,针对性破解理论与实战脱节、前沿理论落地难的瓶颈。一是深研认知电磁学和电磁制胜机理,重点探索电磁环境精确建模、内生电磁空间安全等前沿,突破传统理论在复杂电磁环境

下建模的精度瓶颈,构建适配电磁空间安全新时代需求的理论体系;二是加快量子电磁感知、微波光子抗干扰和超材料电磁伪装等新型理论实用化探索,挖掘前沿理论潜力,抢占未来发展制高点;三是强化电磁空间安全理论与人工智能、量子科技的跨学科机制,推进数据互通、成果共享,提升基础理论原始创新效能。

#### 4.2 攻坚电磁空间安全核心技术瓶颈

紧扣能力短板,聚力攻坚“卡脖子”技术,推动成果向实战化转化,实现体系能力整体跃升。一是攻研基础核心技术,重点突破超宽带一体化、未知辐射源识别、电磁频谱大模型、跨域频谱协同、内生抗干扰和功率合成等技术,打破底层器件、精密传感、能量转换等关键制约,提升核心技术自主可控水平;二是打通工程化应用堵点,推动小型化、低功率、高可靠的电磁装备研发,开展强电磁脉冲环境下装备抗干扰测试与加固设计,深研强电磁空间对抗环境下技术适配与体系运用,破解复杂场景装备协同运用难题,推动技术与装备深度融合;三是强化优势领域技术领跑,持续加大通感一体化、智能频谱决策和智能抗干扰等攻关力度,搭建电磁空间数智孪生环境,开展实战化场景验证,加快关键领域从“跟跑、并跑”向“领跑”转变。

#### 4.3 激活电磁空间安全创新发展动能

结合电磁空间“跨域、跨学科、智能化升级”的发展特点,打破领域壁垒,以新兴技术赋能,培育电磁空间安全创新增长极。一是优化电磁频谱管理、电磁空间攻防、电磁波生物效应安全等方向的学科结构,推动设立电磁空间安全一级学科,在军队院校与一流学科高校增设相关本科专业及研究生培养方向,建立“理论-技术-实战”三位一体人才培养模式,破解专业人才供给不足、学科支撑薄弱的难题;二是推动人工智能、大数据、云边协同等新一代信息技术与电磁空间安全深度融合,发展数智赋能电磁环境模拟、智能频谱管控、全域频谱认知等技术,全面提升智能化水平;三是强化与材料、量子 and 生物等前沿学科交叉,发展超材料电磁操控、量子抗干扰通信、智能超表面赋能通信、电磁能量转化和电磁波生物效应安全管控等方向,突破传统技术瓶颈。

#### 4.4 推动电磁空间安全技术应用落地

结合电磁空间“实战需求迫切、技术迭代快速、场景适配性要求高”的特殊性,坚持“研用结合、以战验技”,推动技术快速转化、迭代升级和

实效落地。一是建强产学研用链条,构建以需求为导向、企业为主体、科研院所为支撑的成果转化体系,与部队、企业共建实战化测试基地,开展装备小批量试装试用,缩短从实验室到战场的周期;二是健全迭代升级机制,建立实战反馈驱动的动态迭代机制,紧跟技术前沿和战场需求变化,持续优化技术方案与适配理论体系,提升战场动态适配能力;三是畅通成果转化驱动,完善成果转化政策与平台体系,培育专业化转化人才队伍,建立电磁空间安全技术成果转化评价标准,推动实验室技术向实战化产品、产业化项目的高效转化,推动成果落地生根、发挥实效。

#### 4.5 筑牢电磁空间安全发展支撑根基

结合电磁空间“技术专业性强、测试验证要求高、标准规范不统一”的特殊性,从人才、标准、基础设施等方面系统布局,构建全维度支撑体系,破解支撑能力不足、保障体系不完善的瓶颈。一是打造高素质专业化人才方阵,引育高层次领军人才、青年骨干人才及技能型人才,强化人才培养的技术导向,提升人才供给与核心需求的匹配效能;二是完善实战化技术标准体系,优化制定理论应用规范、技术参数标准及测试评估标准,统一术语与接口规范,推动内生频谱管控、内生抗干扰等自主成果纳入标准体系,提升国际话语权;三是强化实战化研发验证条件,统筹布局高水平实验室、测试外场及仿真平台,完善技术研发、测试与验证基础设施配套体系。

### 5 总结与展望

电磁空间作为信息化战争和大国博弈背景下的新型重要作战域,其安全能力直接关系到国家政治稳定、经济发展及国防安全的核心根基。本文系统梳理电磁空间安全概念内涵,构建了基于系统论的多维度电磁空间安全体系架构,分析了电磁空间安全技术发展现状及挑战,给出了电磁空间安全技术发展建议。当前,电磁空间安全面临频谱资源争夺激烈、对抗态势升级、规则体系失衡等多重挑战。为有效应对电磁空间安全威胁,应以无人化智能化技术赋能,探索构建数智电磁空间安全演训场,推动具身智能、大模型等智能技术在电磁空间安全领域的应用,通过全维度体系建设,持续提升电磁空间安全能力,筑牢国家电磁空间安全屏障。

### 参考文献(References)

[1] 艾正松. 透视电磁空间作战变化趋势[N/OL]. 解放军

- 报. 2026-02-03[2026-02-06]. [http://www.81.cn/ll\\_208543/16440861.html](http://www.81.cn/ll_208543/16440861.html).
- AI Z S. Perspective on the changing trends of electromagnetic space operations [N/OL]. PLA Daily. 2026-02-03[2026-02-06]. [http://www.81.cn/ll\\_208543/16440861.html](http://www.81.cn/ll_208543/16440861.html). (in Chinese)
- [2] 姚富强, 周宁, 夏春利. 论电磁空间主权[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(6): 19-24.  
YAO F Q, ZHOU N, XIA C L. Electromagnetic space sovereignty[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(6): 19-24. (in Chinese)
- [3] 杨蔚, 高祺, 王渊, 等. 俄乌冲突中电磁频谱应用分析[J]. 航天电子对抗, 2023, 39(3): 1-4, 20.  
YANG W, GAO Q, WANG Y, et al. Analysis of electromagnetic spectrum application in the Russian-Ukraine conflict[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2023, 39(3): 1-4, 20. (in Chinese)
- [4] 张景伟, 王彬, 吴桐, 等. 从“绝对决心”行动看有人/无人机协同作战体系的构建与启示[J]. 航天电子对抗, 2026, 42(1): 1-6.  
ZHANG J W, WANG B, WU T, et al. Constructing and enlightening the manned/unmanned aerial vehicle collaborative combat system: insights from operation “Absolute Resolve” [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2026, 42(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] The operational environment 2024-2034: large-scale combat operations [EB/OL]. (2025-04-26) [2025-12-12]. <https://www.cliffsnotes.com/study-notes/26762322>.
- [6] The White House. National spectrum strategy[R/OL]. (2023-11-13) [2025-12-12]. [https://www.ntia.gov/sites/default/files/publications/national\\_spectrum\\_strategy\\_final.pdf](https://www.ntia.gov/sites/default/files/publications/national_spectrum_strategy_final.pdf).
- [7] 常壮, 冯书兴, 孙健, 等. 美军电磁频谱战发展沿革与现状述评[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(1): 54-59.  
CHANG Z, FENG S X, SUN J, et al. Commentary on developing evolution and status-quo of U. S. armed forces' joint electromagnetic spectrum operations [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2018, 34(1): 54-59. (in Chinese)
- [8] 杨安博, 查卓辰, 陈文松, 等. 纵览: 电子战发展历程[J]. 军事文摘, 2025(3): 20-22.  
YANG A B, ZHA Z C, CHEN W S, et al. Overview: the evolution of electronic warfare [J]. Military Digest, 2025(3): 20-22. (in Chinese)
- [9] 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(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(4): 319-324. (in Chinese)
- [10] 王怀. 美国加强网络电磁空间竞争实力的举措(上)[J]. 国防, 2011(11): 78-79.  
WANG H. Measures of the United States to strengthen its competitive strength in cyberspace and electromagnetic space (Part 1)[J]. National Defense, 2011(11): 78-79. (in Chinese)
- [11] 王之娇. 国家电磁空间安全的特点与对策[J]. 国防科技, 2008, 29(6): 33-36.  
WANG Z J. Characteristics and countermeasures of national electromagnetic space security [J]. National Defense Technology, 2008, 29(6): 33-36. (in Chinese)
- [12] 李欣童, 杨蔚, 郑鹏飞, 等. 美军电磁频谱领域的发展[J]. 航天电子对抗, 2023, 39(5): 54-59.  
LI X T, YANG W, ZHENG P F, et al. The development of electromagnetic spectrum field of US military[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2023, 39(5): 54-59. (in Chinese)
- [13] 彭进先, 桑苗苗, 耿丹, 等. 美军电磁空间作战研究[J]. 舰船电子对抗, 2024, 47(3): 35-39.  
PENG J X, SANG M M, GENG D, et al. Research into the electromagnetic space operation of U. S. military [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2024, 47(3): 35-39. (in Chinese)
- [14] 姚富强, 刘忠英, 赵杭生. 短波电磁环境问题研究: 对认知无线电等通信技术再认识[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(2): 156-161, 179.  
YAO F Q, LIU Z Y, ZHAO H S. Study on the issues of HF electromagnetic environment [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(2): 156-161, 179. (in Chinese)
- [15] 姚富强, 张余, 柳永祥. 电磁频谱安全与控制[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(3): 278-283.  
YAO F Q, ZHANG Y, LIU Y X. Security and control for electromagnetic spectrum [J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(3): 278-283. (in Chinese)
- [16] 张余, 柳永祥, 张涛, 等. 电磁频谱战作战样式初探[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(5): 14-17, 50.  
ZHANG Y, LIU Y X, ZHANG T, et al. The patterns of operations for the electromagnetic spectrum warfare [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2017, 33(5): 14-17, 50. (in Chinese)
- [17] Curtis E. Lemay Center. Annex 3-51 electromagnetic warfare and electromagnetic spectrum operations[Z/OL]. (2019-07-30) [2025-12-12]. <https://globalintelhub.com/wp-content/uploads/2022/03/3-51-DO8-EW-EMS-Support.pdf>.
- [18] 杨心怡, 陈昌孝, 张逸楠. 从 JP 3-85 到 CJCSM 3320.01D: 美军电磁频谱作战条令的演变与整合逻辑[J]. 军事文摘, 2025(19): 57-60.  
YANG X Y, CHEN C X, ZHANG Y N. From JP 3-85 to CJCSM 3320.01D: the evolution and integration logic of U. S. military electromagnetic spectrum operations doctrine[J]. Military Digest, 2025(19): 57-60. (in Chinese)
- [19] 徐弘良. 美国《电磁频谱优势战略》报告解析[J]. 中国无线电, 2021(1): 24-25, 30.  
XU H L. Analysis of the U. S. "electromagnetic spectrum superiority strategy" report [J]. China Radio, 2021(1): 24-25, 30. (in Chinese)
- [20] 美国陆军部总部. FM 3-12: 网络空间作战与电磁战(译文)[J]. 信息安全与通信保密, 2021(10): 51-66.  
Headquarters, Department of the Army. FM 3-12: cyberspace operations and electromagnetic warfare [J]. Information Security and Communications Privacy, 2021(10): 51-66. (in Chinese)
- [21] 刘都群, 郭冠宇. 俄罗斯电子战领域发展现状与趋势分析[J]. 飞航导弹, 2019(10): 16-19.  
LIU D Q, GUO G Y. Analysis of the current development status and trends in Russia's electronic warfare domain [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(10): 16-19. (in Chinese)
- [22] THOMAS T. Russia's electronic warfare force: blending

- concepts with capabilities[Z/OL]. (2020-08-31) [2025-12-12]. <https://www.mitre.org/news-insights/publication/russias-electronic-warfare-force-blending-concepts-capabilities>.
- [23] 张琪玮. 2024 年度信息通信领域十大科技进展出炉[N]. 中国电子报, 2025-05-20(6).  
ZHANG Q W. Top ten scientific and technological advances in the information and communication field in 2024 announced[N]. China Electronics News, 2025-05-20(6). (in Chinese)
- [24] 董超, 经宇骞, 屈毓铨, 等. 面向低空智联网频谱认知与决策的云边缘融合体系架构[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 1-12.  
DONG C, JING Y Q, QU Y B, et al. Cloud-edge-device fusion architecture oriented to spectrum cognition and decision in low altitude intelligence network [J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 1-12. (in Chinese)
- [25] 翟振刚. 基于生成式人工智能的电磁频谱智能认知体系研究[J]. 航天电子对抗, 2025, 41(3): 28-33.  
ZHAI Z G. The electromagnetic spectrum intelligent cognitive systems based on the generative artificial intelligence [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2025, 41(3): 28-33. (in Chinese)
- [26] 黄程, 王盈丰. 基于深度聚类的无监督雷达信号智能分选方法[J]. 舰船电子对抗, 2025, 48(6): 60-65.  
HUANG C, WANG Y F. An unsupervised intelligent sorting method of radar signal based on deep clustering [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2025, 48(6): 60-65. (in Chinese)
- [27] SINGH M, SINGH S P, SATIJA U. High-mobility emitter identification framework using RF-fingerprints in orthogonal time-frequency space system [J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(1): 26-30.
- [28] 周树德, 李春霞. 面向智能电磁空间作战的电磁模型体系构建方法[J]. 舰船电子对抗, 2025, 48(4): 1-7, 18.  
ZHOU S D, LI C X. Construction method of electromagnetic model system for intelligent electromagnetic space warfare[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2025, 48(4): 1-7, 18. (in Chinese)
- [29] 杨健, 严牧, 赵研, 等. 群体频谱智能理论及架构研究[J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(6): 850-865.  
YANG J, YAN M, ZHAO Y, et al. Research on theory and architectural framework of swarm spectrum intelligence [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(6): 850-865. (in Chinese)
- [30] LIU S, SHI Z P, YANG J, et al. Double-RIS assisted cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(4): 1259-1263.
- [31] 郭兰图, 姚孟辰, 牟伟清, 等. 天基电磁环境感知星座关键技术与发展演进[J/OL]. 国防科技大学学报: 1-17 [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20260115.1016.002>.  
GUO L T, YAO M C, MU W Q, et al. Key technologies and evolutionary development of space-based constellations for electromagnetic environment sensing [J/OL]. Journal of National University of Defense Technology: 1-17 [2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20260115.1016.002>. (in Chinese)
- [32] 查淞, 夏海洋, 黄纪军, 等. 基于监测数据的电磁频谱地图构建与验证[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(3): 171-178.  
ZHA S, XIA H Y, HUANG J J, et al. Construction and verification of spectrum map by using monitoring data [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(3): 171-178. (in Chinese)
- [33] LI X M, LIN B J, LI H M. Intelligent detection and early warning of power system cybersecurity threats based on multimodal large language models [J]. Journal of Cyber Security and Mobility, 2025, 14(6): 1375-1400.
- [34] KIM H, PARK H, WON J, et al. Multi-band quantum wireless sensing for Rydberg atomic receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(6): 1476-1480.
- [35] KHALID U, DUONG T Q, SHIN H. Artificial neural networks for quantum sensing; metrologically resourceful state detection [C]//Proceedings of the International Conference on Quantum Communications, Networking, and Computing (QCNC), 2024: 259-264.
- [36] 郑红星. 复杂任务/环境下的异构无人机集群全周期任务筹划与在线规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
ZHENG H X. Full-cycle mission planning and online planning of heterogeneous UAV swarm under complex mission/environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [37] 廖乃稳, 何攀峰, 张余, 等. 面向隐蔽侦察任务的无人机中继通信频谱资源优化方法[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(2): 65-74.  
LIAO N W, HE P F, ZHANG Y, et al. Spectrum resource optimization method of UAV-relaying communication for covert reconnaissance mission [J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(2): 65-74. (in Chinese)
- [38] 葛君刚. 面向未来无线网络的智能频谱共享技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.  
GE J G. Research on intelligent spectrum sharing technology for future wireless networks [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [39] 童乐, 梁涛, 张余, 等. 基于多智能体强化学习的动态频谱分配方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(4): 573-580.  
TONG L, LIANG T, ZHANG Y, et al. Dynamic spectrum allocation method based on multi-agent reinforcement learning [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(4): 573-580. (in Chinese)
- [40] 周鑫, 何攀峰, 陈勇, 等. 混合频谱共享方式下多用户动态频谱分配算法[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 977-985.  
ZHOU X, HE P F, CHEN Y, et al. Multi-user dynamic spectrum allocation algorithm under hybrid spectrum sharing mode [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 977-985. (in Chinese)
- [41] 张余, 钱鹏智, 陈勇, 等. 面向泛在频谱信息实时更新与安全传输的动态频谱分配方法[J]. 电波科学学报, 2023, 38(3): 429-437.  
ZHANG Y, QIAN P Z, CHEN Y, et al. Dynamic spectrum allocation method for the requirements of real-time updating and secure transmission of the ubiquitous spectrum information [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(3): 429-437. (in Chinese)
- [42] SU Y, FAN W H, MENG Q C, et al. Joint adaptive

- aggregation and resource allocation for hierarchical federated learning systems based on edge-cloud collaboration[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2025, 13(1): 369–382.
- [43] WEN D Z, ZHOU Y, LI X Y, et al. A survey on integrated sensing, communication, and computation [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 27(5): 3058–3098.
- [44] 李亚南, 王凯, 刘得军, 等. 外军电磁脉冲武器发展综述[J]. 现代防御技术, 2025, 53(5): 39–48.  
LI Y N, WANG K, LIU D J, et al. Review of development of electromagnetic pulse weapons in foreign armies[J]. Modern Defence Technology, 2025, 53(5): 39–48. (in Chinese)
- [45] 章程然. 电磁信号感知及智能干扰设计与仿真实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.  
ZHANG C R. Electromagnetic signal perception and design and simulation of intelligent interference [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [46] 潘继飞, 曾芳玲, 刘方正, 等. 分布式电子对抗关键技术研究综述[J]. 信息对抗技术, 2026, 5(1): 1–14.  
PAN J F, ZENG F L, LIU F Z, et al. A review of key technologies of distributed electronic countermeasures [J]. Information Countermeasure Technology, 2026, 5(1): 1–14. (in Chinese)
- [47] 张余, 陈勇, 柳永祥, 等. 用频装备电磁频谱参数泄露机理及防护方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 1066–1071, 1079.  
ZHANG Y, CHEN Y, LIU Y X, et al. Research on the electromagnetic spectrum parameters leaking mechanism and defense approach for the spectrum-dependent equipment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 1066–1071, 1079. (in Chinese)
- [48] 姚富强, 于森, 郭鹏程, 等. 盲源分离通信抗干扰技术与实践[J]. 通信学报, 2023, 44(10): 1–12.  
YAO F Q, YU M, GUO P C, et al. Blind source separation communication anti-jamming technology and practice [J]. Journal on Communications, 2023, 44(10): 1–12. (in Chinese)
- [49] ARANGI D, TEJESWARI T, SAIKIRAN K, et al. Adaptive beamforming for optimizing wireless network performance using machine learning [C]//Proceedings of the IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), 2025: 1–3.
- [50] 马松, 李黎, 黎伟, 等. 基于近端策略优化的智能抗干扰决策算法[J]. 通信学报, 2024, 45(8): 249–257.  
MA S, LI L, LI W, et al. Intelligent anti-jamming decision algorithm based on proximal policy optimization[J]. Journal on Communications, 2024, 45(8): 249–257. (in Chinese)
- [51] 钱超. 智能电磁隐身和超散射的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
QIAN C. Experimental study of intelligent electromagnetic invisibility cloaking and superscattering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [52] 马源, 王函, 倪忠强, 等. 碳纳米管/氧化锌协同增强碳纤维复合材料的电磁屏蔽性能[J]. 材料研究学报, 2024, 38(1): 61–70.  
MA Y, WANG H, NI Z Q, et al. Synergistic effect of carbon nanotubes with zinc oxide nanowires for enhanced electromagnetic shielding performance of hybrid carbon fiber/epoxy composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2024, 38(1): 61–70. (in Chinese)
- [53] YAO F Q, ZHU Y G, SUN Y F, et al. Wireless communications “ $N + 1$  dimensionality” endogenous anti-jamming: theory and techniques [J]. Security and Safety, 2023, 2: 2023003.
- [54] 朱勇刚, 孙艺夫, 姚富强, 等. 基于多智能超表面的信道空间内生抗干扰方法[J]. 通信学报, 2023, 44(10): 13–22.  
ZHU Y G, SUN Y F, YAO F Q, et al. Channel-space endogenous anti-jamming method based on multi-reconfigurable intelligent surface [J]. Journal on Communications, 2023, 44(10): 13–22. (in Chinese)
- [55] 苏周, 韩俊, 刘飞, 等. 美军认知电子战发展特点和趋势研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(11): 1057–1064.  
SU Z, HAN J, LIU F, et al. Research on characteristics and trends of the development of cognitive EW in the US military[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(11): 1057–1064. (in Chinese)
- [56] 张乃千, 王扬, 王方, 等. 人工智能在美军电磁频谱作战的发展应用[C]//第十届中国指挥控制大会论文集, 2022: 93–97.  
ZHANG N Q, WANG Y, WANG F, et al. Development and application of artificial intelligence in electromagnetic spectrum warfare of US army [C]//Proceedings of the 10th China Command and Control Conference, 2022: 93–97. (in Chinese)
- [57] 赵海燕, 周丽. 国外高功率微波武器发展研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(4): 42–48.  
ZHAO H Y, ZHOU L. Research on the development of high-power microwave weapon abroad[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 42–48. (in Chinese)
- [58] United States Government US Army. Joint doctrine notes 3–16: joint electromagnetic spectrum operations [R/OL]. (2016–10–20) [2025–12–20]. [https://www.jedi-sec.us/downloads/MISC\\_PDF/jdn3\\_16.pdf](https://www.jedi-sec.us/downloads/MISC_PDF/jdn3_16.pdf).
- [59] 刘澄. 美军推进电磁频谱力量建设[N]. 中国国防报, 2022–8–12(4).  
LIU C. U. S. military advances electromagnetic spectrum force construction [N]. China National Defense News, 2022–8–12(4). (in Chinese)
- [60] 刘燕, 汪祥, 王涛. 浅析美国联合电磁频谱作战中心运作机制及特点[J]. 中国无线电, 2025(6): 54–56.  
LIU Y, WANG X, WANG T. Brief analysis on the operation mechanism and characteristics of the U. S. Joint Electromagnetic Spectrum Operations Center [J]. China Radio, 2025(6): 54–56. (in Chinese)
- [61] 顾国华, 易芳. 从克拉苏哈–4 摧毁叙无人机看俄军电子战发展[J]. 军事文摘, 2020(4): 42–46.  
GU G H, YI F. Viewing the development of Russian electronic warfare from the destruction of Syrian UAVs by Krasukha-4[J]. Military Digest, 2020(4): 42–46. (in Chinese)
- [62] 李军. “午夜之锤”: 一次危险的霸权展示 [EB/OL]. (2025–06–25) [2026–01–01]. <https://www.xinhuanet.com/world/20250625/093323cb89004ea88f06e9ee9f71014f/c.html>.  
LI J. “Midnight hammer”: a dangerous display of hegemony

- [EB/OL]. (2025-06-25) [2026-01-01]. <https://www.xinhuanet.com/world/20250625/093323cb89004ea88f06e9ee9f71014f/c.html>. (in Chinese)
- [63] 郭瑾, 安永旺, 付倩倩. 近期局部冲突中要地电磁防护举措及经验启示[C]//第十三届中国指挥控制大会论文集, 2025: 1382-1385.
- GUO J, AN Y W, FU Q Q. Measures and inspiration of electromagnetic protection for critical areas from recent localized conflicts [C]//Proceedings of the 13th China Command and Control Conference, 2025: 1382-1385. (in Chinese)
- [64] PERSAUD D. Extra-terrestrial broadband: negotiating the seams of starlink satellite Internet infrastructure [C]//Proceedings of the ACM SIGCAS/SIGCHI Conference on Computing and Sustainable Societies, 2025: 214-227.
- [65] 陈志远. 基于数字编码超表面的电磁空间安全技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- CHEN Z Y. Investigations of electromagnetic space security based on digital coding metasurface [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [66] 谢春茂, 张川, 黄明, 等. 电磁频谱空间应用及发展趋势综述[J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(2): 161-173.
- XIE C M, ZHANG C, HUANG M, et al. A review of the applications and development trends of electromagnetic spectrum space [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2024, 53(2): 161-173. (in Chinese)
- [67] 赵宏佳. 基于深度学习的电磁信号智能识别与软件实现[D]. 北京: 北方工业大学, 2025.
- ZHAO H J. Intelligent recognition of electromagnetic signals based on deep learning and software implementation [D]. Beijing: North China University of Technology, 2025. (in Chinese)
- [68] 张余, 陈勇, 张建照, 等. 面向异构无线网络的动态频谱管理技术研究[J]. 通信对抗, 2021, 40(4): 1-6.
- ZHANG Y, CHEN Y, ZHANG J Z, et al. Research on dynamic spectrum management technology for heterogeneous wireless networks [J]. Communication Countermeasures, 2021, 40(4): 1-6. (in Chinese)
- [69] 孙广泰, 姜水桥. 军事电磁频谱管理中6G通信的挑战与对策[C]//第十三届中国指挥控制大会论文集, 2025: 1357-1360.
- SUN G T, JIANG S Q. Challenges and countermeasures of 6G communication in military electromagnetic spectrum management [C]//Proceedings of the 13th China Command and Control Conference, 2025: 1357-1360. (in Chinese)
- [70] International Telecommunication Union. Radio regulations (edition of 2024) [EB/OL]. [2026-01-01]. <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=66704>.
- [71] ERICSSON. Ericsson mobility report [R/OL]. [2026-04-27]. <https://www.ericsson.com/4aca6f/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2025/ericsson-mobility-report-november-2025.pdf>.
- [72] 侯颖智, 王伟, 陈泳, 等. 干扰环境下面向NOMA的多无人机中继通信资源联合优化方法[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(5): 40-50.
- HOU Y Z, WANG W, CHEN Y, et al. Joint optimization method for multi-UAV relay communication resources facing NOMA under interference conditions [J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(5): 40-50. (in Chinese)
- [73] PARK W, KAM D G, BRÜNS H D, et al. Numerical investigation of orbital angular momentum density of antenna arrays based on the method of moments [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), 2018: 88-93.
- [74] ETSI. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz; ETSI TR 138 901 [R/OL]. [2026-01-01]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/138900/138999/138901/17.00.00\\_60/tr\\_138901v170000p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900/138999/138901/17.00.00_60/tr_138901v170000p.pdf).
- [75] 刘文聪, 梁圆龙, 黄贤俊, 等. 典型光电系统强电磁脉冲耦合分析与加固方法[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(4): 73-84.
- LIU W C, LIANG Y L, HUANG X J, et al. Coupling analysis and reinforcement method of high electromagnetic pulse in typical optoelectronic systems [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(4): 73-84. (in Chinese)
- [76] 赵欣洋, 尹琦云, 杨晨, 等. 孔缝尺寸参数对腔体的5G屏蔽效能影响规律研究[J]. 电子技术应用, 2023, 49(4): 16-20.
- ZHAO X Y, YIN Q Y, YANG C, et al. Influence of aperture size parameters on 5G shielding effectiveness of shielding cavity [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(4): 16-20. (in Chinese)