

复杂电磁环境下通信对抗问题研究

白金龙

中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北 石家庄 050081

摘要: 复杂电磁环境由自然干扰、人为对抗及动态频谱冲突交织构成,导致通信链路受阻、导航失效及武器系统瘫痪。研究聚焦通信对抗侦察、智能抗干扰与干扰反击一体化、多频段融合抗干扰及协同对抗技术,通过自适应跳频、深度学习频谱预测、空时编码等手段提升抗干扰能力,结合仿真验证与实战化训练,构建电磁韧性通信体系,为信息化战场制电磁权争夺提供技术支持。

关键词: 复杂电磁环境; 通信对抗; 关键技术; 实践路径与策略建议

引言: 现代战争形态加速向信息化、智能化演进,电磁频谱已成为关乎战场胜负的核心资源。复杂电磁环境融合自然干扰、人为对抗与频谱动态冲突,导致通信系统面临信号截获、链路中断、定位欺骗等多重威胁。如何在强对抗、高动态条件下实现可靠通信与主动反制,成为制电磁权争夺的关键。本研究立足电磁攻防一体化需求,剖析复杂电磁环境特性,探索智能抗干扰、多域协同等通信对抗技术,为构建韧性电磁空间提供理论支撑与实践路径。

1 复杂电磁环境特性与建模分析

1.1 复杂电磁环境的构成要素

(1) 自然干扰: 核心为雷电与太阳黑子活动。雷电产生宽频强电磁脉冲致设备损坏,太阳黑子引发电离层扰动干扰通信,二者无对抗属性但会叠加人为对抗效应,加剧环境复杂性。(2) 人为对抗与干扰: 含敌方主动电磁对抗(发射压制、欺骗性干扰破坏我方电子系统,瞄准通信薄弱环节)和民用设备频谱冲突隐患(无线设备激增引发频谱竞争,可能被敌方利用为隐蔽干扰载体)。(3) 动态频谱对抗环境: 核心特征是时空动态性与对抗博弈性,敌我双方动态调整干扰/寻优策略,信道时变性叠加对抗操作,提升频谱争夺利用难度。

1.2 电磁环境复杂度量化模型

(1) 基于熵理论的评估: 通过计算频谱占用、干扰信号分布、对抗时序等维度熵值,量化环境无序度与对抗强度,熵值越高则干扰类型越多、策略越灵活,可直观反映整体对抗态势。(2) 多维度对抗参数建模: 选取干扰功率、对抗带宽、时变对抗节奏为核心参数,分别考量信号强度博弈、频谱争夺范围、敌我动态交互特性,经加权融合实现对抗性电磁环境复杂度精准量化。

1.3 典型对抗场景仿真分析

(1) 城市隐蔽电磁对抗环境仿真: 以繁华城区为对

象,纳入民用通信背景与敌方伪装民用设备的隐蔽干扰源,重点仿真敌方隐蔽干扰效果及我方监测响应能力,结果显示该场景易遭干扰突袭,需提升抗隐蔽干扰与快速反击能力。(2) 战场直接电磁对抗环境仿真: 构建含敌我电子战/通信装备及自然干扰的复合场景,模拟干扰压制、欺骗诱导与反干扰过程,聚焦我方策略抑制效果及敌方干扰升级应对能力,为战术制定提供数据支撑。

2 复杂电磁环境下的通信对抗关键技术

2.1 动态抗干扰与干扰反击一体化技术

(1) 自适应跳频扩频与干扰溯源反击技术: 在传统跳频(FHSS)与直接序列扩频(DSSS)技术基础上,融入干扰溯源与定向反击机制。通过实时监测电磁环境中干扰信号的特征与方位,动态调整跳频图案、速率及扩频码长度规避强干扰频段,同时利用溯源结果引导定向天线向干扰源发射压制信号,实现“抗扰+反击”协同;针对宽带干扰场景,采用FHSS与DSSS混合扩频方案提升抗扰基础,结合干扰信号分析实施针对性反制,确保通信可靠的同时削弱敌方干扰能力。(2) 智能波束成形与空域对抗技术: 依托相控阵天线技术,结合深度学习算法实现波束智能调控与空域干扰对抗。通过构建干扰源方位角、信号强度预测模型,提前预判干扰分布态势,精准生成定向通信波束并屏蔽干扰区域,同时生成定向干扰波束压制敌方通信节点;利用空域滤波技术抑制旁瓣干扰的同时,强化对敌方关键通信链路的波束干扰,实现“通信波束精准对准、对抗波束精准打击”,大幅提升复杂电磁对抗环境下的通信与对抗双重效能^[1]。

2.2 智能频谱感知与对抗性频谱利用技术

(1) 基于深度学习的频谱对抗态势预测: 构建卷积神经网络(CNN)、长短期记忆网络(LSTM)融合模型,输入历史频谱占用数据、敌方干扰特征、对抗时序信息等多维度数据,实现对未来频谱空洞位置、持续时长及

敌方干扰频段变化的精准预测。相较于传统统计预测方法,其预测精度更高、抗干扰鲁棒性更强,为我方抢占优质频谱、规避敌方干扰、实施频谱反击提供提前量支撑。

(2) 认知无线电中的对抗性动态频谱接入策略:基于频谱感知结果,设计“感知-决策-接入-反击-退出”闭环对抗性接入机制。采用机会式接入抢占频谱空洞保障通信,同时通过授权共享接入区域实施频谱干扰,在不影响我方通信的前提下压制敌方频谱利用;引入博弈论优化接入与反击决策,平衡我方通信保障与敌方干扰压制的资源分配,提升频谱资源利用率与对抗效能,缓解复杂电磁对抗环境下的频谱争夺压力。

2.3 多域协同对抗技术

(1) 跨层协同抗扰与反击:打破通信协议各层独立优化的局限,构建物理层与网络层协同对抗机制。物理层通过自适应调制编码、抗干扰波形设计保障自身通信质量,同时生成干扰波形实施物理层压制;网络层基于物理层信道与对抗状态,动态调整路由协议、资源分配策略,避开敌方干扰链路,引导干扰资源指向敌方核心通信节点;通过两层信息交互与联合优化,提升系统对电磁对抗环境动态变化的适配能力,降低单一环节对抗失效风险^[2]。(2) 异构系统协同对抗:整合卫星通信的广覆盖优势、无人机通信的机动灵活特性及地面通信的高带宽能力,构建一体化协同对抗体系。通过统一的资源调度与干扰协同策略,实现不同系统间的干扰信息共享、抗干扰与反击资源互补;在战场极端电磁对抗环境下,可通过系统间无缝切换保障己方通信链路不中断,同时协同实施多源干扰压制,形成全方位电磁对抗优势。

2.4 软件定义无线电(SDR)与人工智能融合对抗技术

(1) SDR架构下的实时对抗信号处理:基于SDR软件可编程、硬件可重构的优势,开发自适应信号处理与对抗信号生成模块,实现对不同体制通信信号、干扰信号的实时解调、分析识别与针对性干扰信号生成。通过软件升级快速适配新的通信协议与对抗算法,无需更换硬件平台即可实现对抗策略迭代,提升通信对抗系统的快速响应能力与环境适配性。(2) 强化学习在智能对抗策略生成中的应用:将强化学习算法嵌入SDR系统,以“最大化己方通信效能、最小化敌方通信与干扰效能”为目标,构建智能决策代理。通过与复杂电磁对抗环境的持续交互,自主学习不同干扰场景下的最优抗干扰与反击策略,实现干扰规避、干扰抑制、定向反击等策略的实时动态生成,提升通信对抗系统的自主智能对抗能力。

3 复杂电磁环境下通信对抗系统设计与仿真验证

3.1 系统总体架构设计

(1) 感知与对抗侦察模块:作为系统“感知器官”,通过分布式传感器阵列实时捕获全域电磁信号,经滤波、放大、数字化预处理后,提取频率、功率、调制方式等关键特征,精准识别干扰源方位、类型及敌方通信节点参数,将处理后信息传输至决策模块提供数据支撑。(2) 对抗决策模块:作为系统“核心大脑”,集成抗干扰与反击策略库及智能算法引擎,结合电磁环境复杂度、干扰强度等信息动态生成最优对抗方案(含频谱分配、波形选择等),并向执行模块下发控制指令。(3) 执行与反馈模块:作为决策执行载体,涵盖通信收发、自适应天线阵列等硬件组件,精准响应指令完成动态频谱接入、定向干扰发射等操作,同时将执行状态、通信效果等反馈至感知模块,形成“感知-决策-执行-反馈”闭环控制。

3.2 关键对抗算法实现

(1) 基于CNN的信号识别算法:针对干扰类型多、敌方信号隐蔽性强等问题,构建CNN识别模型,以信号时频图为输入,通过卷积、池化层提取深层时频特征,借助全连接层与Softmax分类器精准识别窄带、宽带压制等干扰类型及敌方通信信号体制,准确率达95%以上,为针对性对抗策略奠定基础。(2) 基于DRL的资源分配算法:引入DRL框架解决动态环境下资源优化问题,将频谱、功率、波束指向作为动作空间,以己方通信吞吐量最大化、误码率最小化及敌方干扰效能最小化为奖励函数,通过智能体与环境交互训练实现资源实时动态分配,具备自主学习自适应能力,可快速适配环境变化^[3]。

3.3 对抗仿真平台搭建

(1) MATLAB/Simulink与GNURadio联合仿真:利用MATLAB/Simulink搭建电磁对抗环境、敌我通信链路及干扰源模型,通过GNURadio实现信号处理、协议仿真与对抗信号生成,二者协同联动可模拟多类型对抗场景,快速验证系统功能并优化算法参数,降低测试成本。(2) 半实物对抗仿真测试环境:基于USRP搭建平台,由USRP完成信号实时收发、射频处理等,上位机运行核心对抗算法与控制程序;接入真实电磁环境或模拟敌方干扰源开展硬件在环测试,验证系统在硬件约束下的性能,提升仿真结果可信度与工程实用性。

3.4 对抗实验结果分析

(1) 对抗性能对比:以传统通信系统、单纯抗干扰系统为基准,在相同敌方干扰场景下测试误码率、吞吐量等指标。结果显示,所设计系统强干扰环境下误码率降低40%以上,吞吐量提升30%以上,敌方干扰压制效果提升50%以上,验证了智能算法与模块化架构的有效性。(2) 动态对抗环境适应性验证:模拟敌方干扰源迁移、

策略迭代及我方节点移动场景,监测信号质量、策略调整延迟等。结果表明,敌方干扰源移动速度 $\leq 80\text{km/h}$ 、我方节点 $\leq 60\text{km/h}$ 时,通信链路中断率低于5%,策略调整延迟 $\leq 10\text{ms}$,具备良好动态鲁棒性。

4 复杂电磁环境下通信对抗技术的实践路径与策略建议

4.1 技术突破路径

(1) 对抗导向基础研究强化:聚焦量子通信、AI对抗、光算协同等前沿领域加大科研投入,攻关量子密钥分发、纠缠调控等核心技术提升通信保密抗破解能力,突破AI驱动的干扰识别、对抗策略生成与反制算法瓶颈,探索光算协同的高效对抗信号处理架构;同步布局核心算法专利池,构建技术壁垒,为产业化提供知识产权保障。(2) 实战化装备研发创新:以实战化、小型化为导向推进装备迭代,加速量子通信对抗设备小型化、低功耗研发以适配多元场景;突破低损耗空芯光纤技术提升传输效率与抗干扰能力,研发星间激光链路组网与对抗技术,构建天地一体化体系;开发便携式机动式干扰反击装备,强化战场前沿对抗能力。(3) 对抗场景试验验证加速:构建6G通感智算融合外场试验网与全场景对抗性能验证平台,模拟沉浸式通信对抗、泛在连接对抗等典型场景,开展实战化测试,验证技术在高动态强对抗条件下的性能,为技术优化与装备定型提供数据支撑。

4.2 应用推广策略

(1) 军事领域实战部署:推动量子通信对抗技术在单兵、舰艇编队、航母战斗群中部署,构建全域保密通信与电磁对抗网络;通过量子加密保障作战指令与情报传输,依托智能装备实施全域电磁压制与反制,提升跨军种协同作战的通信保障与电磁制权掌控能力。(2) 国家安全对抗防护:面向金融、政务、能源等关键领域,推广量子加密专线与电磁对抗防护体系;构建“量子-经典”协同传输防护体系实现核心数据分层防护,为关键信息基础设施部署干扰监测与反制设备,抵御电磁攻击

保障安全。(3) 经济领域对抗赋能:政策引导与市场驱动结合,支持运营商建设卫星互联网与电磁防护融合网络;以物联网、智能交通、工业互联网为切入点拓展商业化应用,开发工业级干扰监测防护设备,形成“研发-应用-效益反哺”的良性循环^[4]。

4.3 政策与生态支持

(1) 对抗技术导向政策引导:出台量子通信、6G等关键技术研发专项政策与扶持资金,鼓励产学研联合攻关核心技术;建立共性技术研发平台,打通全链条壁垒加速成果转化;完善相关标准体系,规范装备研发与应用流程。(2) 国际对抗技术合作与竞争:主动参与ITU、3GPP等国际组织标准制定,贡献中国技术方案与提案;加强国际技术交流合作,吸引优质资源参与产业生态建设,同时强化自主创新应对国际竞争,提升全球通信对抗技术生态中的话语权与影响力。

结束语

复杂电磁环境下的通信对抗是信息化战争的核心挑战之一。本研究通过剖析电磁环境特性、突破智能抗干扰与协同反制技术,构建了“感知-决策-执行-反馈”一体化对抗体系。实验验证表明,所提方案可显著提升复杂场景下的通信可靠性与反制效能。未来需持续深化AI与量子技术融合应用,推动装备实战化迭代,为夺取制电磁权提供更强大的技术引擎,助力我国电磁空间安全能力迈向新高度。

参考文献

- [1]黄宇,赵杰,陈建国.复杂电磁环境下电子通信信号抗干扰方法[J].计算机仿真,2023,40(08):159-163.
- [2]郑哲.高压输电线路电力通信系统的抗干扰技术研究[J].中国宽带,2025,21(10):130-132.
- [3]赵琳,徐蓓蓓.OFDM技术在电视广播视频通信抗干扰中的应用[J].电视技术,2025,49(07):111-113.
- [4]李振坤.宽频段电台在复杂战场电磁环境下的抗干扰设计研究[J].坦克装甲车辆,2025,(20):76-77.