

微波数字通信抗干扰技术在复杂环境工程应用与实践

卢昌武 刘福熬 王建鑫 王忠涛 立博
锡林郭勒盟微波总站 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘要: 微波数字通信在复杂环境中面临多样干扰, 本文阐述了微波数字通信抗干扰技术, 涵盖频谱域、时域、空域及链路层和网络层技术分类与原理。分析自然、人为及混合复杂环境干扰特性, 提出不同环境下抗干扰技术适配策略与融合应用路径。构建以分层递进结构为基础的抗干扰技术体系, 阐述协同机制与可扩展性设计, 为复杂环境下微波数字通信抗干扰提供全面解决方案。

关键词: 微波数字通信; 抗干扰技术; 复杂环境; 技术体系; 适配策略

引言: 微波数字通信凭借高速率、大容量等优势广泛应用, 然而在实际运行过程中, 复杂环境干扰严重影响通信质量, 成为制约进一步发展的关键因素。自然环境干扰不可控且动态演变, 人为干扰分有意与无意, 二者还常交织形成混合干扰。在此背景下, 研究有效的抗干扰技术至关重要, 对保障通信稳定、提升系统性能意义重大。

1 微波数字通信抗干扰技术分类及核心原理

1.1 频谱域抗干扰技术

频谱域技术聚焦于频谱资源的动态利用与干扰规避。跳频技术通过伪随机序列控制载波频率快速跳变, 使信号在时间维度上分散于多个频点, 降低被连续截获或干扰的概率^[1]。扩频技术将信号频谱扩展至远超原始带宽的范围, 利用处理增益提升抗窄带干扰能力, 直接序列扩频通过伪随机码调制实现频谱扩展, 跳时扩频则在时域上引入随机跳变进一步增强隐蔽性。自适应频谱分配技术结合实时频谱感知与认知决策, 动态选择未被干扰的空闲频段进行数据传输, 通过机器学习算法预测干扰模式并优化频段切换策略, 实现频谱资源的高效利用。

1.2 时域抗干扰技术

时域技术侧重于信号时间特性的优化处理。自适应调制编码技术根据信道质量实时调整调制方式与编码速率, 在信噪比较高时采用高阶调制提升传输效率, 在衰落严重时切换至低阶调制保障链路连通性。时域滤波技术通过设计匹配滤波器或自适应均衡器, 补偿多径效应引起的码间干扰, 利用有限冲激响应滤波器消除时延扩展导致的信号失真。脉冲压缩技术针对雷达等脉冲通信系统, 通过发射宽脉冲提升能量并接收时压缩窄脉冲提高分辨率, 在保持作用距离的同时增强抗干扰能力。

1.3 空域抗干扰技术

空域技术利用天线阵列的空间选择性实现干扰抑

制。智能天线技术通过多天线单元接收信号并加权合成, 形成指向性波束增强目标方向信号增益, 同时利用零陷对准干扰方向实现空间滤波。波束成形技术进一步优化天线权值计算, 结合最大比合并或等增益合并准则, 在动态环境中实时调整波束指向以跟踪移动终端。空时编码技术将空间分集与时间分集结合, 通过多天线同时传输携带相同信息的不同编码信号, 接收端利用联合解码恢复原始数据, 显著提升高衰落环境下的传输可靠性。

1.4 链路层及网络层抗干扰技术

链路层及网络层技术通过协议优化与资源冗余设计增强系统鲁棒性。自适应路由技术根据网络拓扑与干扰分布动态选择传输路径, 避开故障节点或高干扰区域, 利用分布式算法实现快速收敛与路径更新, 路径更新周期可设置为1秒。链路自适应调整技术结合自动重传请求与混合自动重传请求机制, 根据链路质量调整数据分段大小与重传策略, 数据分段大小可设置为1024字节, 平衡传输效率与可靠性^[2]。网络冗余设计技术通过部署2条以上备用链路或节点, 在主链路失效时快速切换至冗余资源, 结合分布式存储与计算架构提升系统容错能力, 确保关键业务在极端环境下的持续运行。

2 复杂环境对微波数字通信的干扰特性分析

2.1 自然复杂环境干扰特性

自然环境中的干扰因素具有不可控性与动态演变特征, 对微波信号传输产生多维度影响。极端气象环境干扰主要表现为大气衰减与散射效应增强, 暴雨天气中雨滴对微波频段的吸收损耗随降雨强度增加而显著上升, 降雨强度为50毫米/小时, 2.4GHz频段的路径损耗增加3dB; 雾天水汽凝结导致信号路径损耗增加, 能见度为100米时, 5GHz频段的损耗增加1.5dB; 沙尘暴中颗粒物对高频信号的散射作用进一步降低接收信噪比, 沙尘

浓度为1克/立方米时,10GHz频段的损耗增加2dB。地形地貌环境干扰则源于信号传播路径中的遮挡与反射,山脉、高楼等障碍物引发多径效应,使接收信号产生时延扩展与相位畸变,丘陵地带因地形起伏导致信号覆盖盲区与弱场区交替出现,障碍物高度为100米时,信号覆盖半径减少200米;海洋环境因海面反射产生多普勒频移,影响高速移动场景下的信号同步,移动速度为50米/秒时,频移量达500Hz。电磁自然噪声干扰涵盖宇宙背景辐射与大气放电现象,太阳黑子活动引发的电离层扰动导致信号相位闪烁,电离层电子密度为 10^{12} 个/立方米时,相位闪烁幅度达0.1弧度;雷电产生的瞬态电磁脉冲覆盖宽频段,对低功率通信设备形成强冲击干扰,脉冲宽度为1微秒时,峰值功率达100千瓦。

2.2 人为复杂环境干扰特性

人为干扰分为有意干扰与无意干扰两类,呈现差异化作用机制。有意干扰通过专用设备发射针对性信号,压制式干扰采用大功率噪声覆盖目标频段,使接收机饱和和无法正常解调,干扰功率为100瓦时,接收机信噪比下降20dB;欺骗式干扰则模拟合法信号特征,通过伪造导航信息或控制指令破坏系统决策逻辑,此类干扰具备频段可调、功率可控的灵活攻击能力,频段调整范围为100MHz至3GHz,功率调节范围为1瓦至100瓦。无意干扰源于非通信设备的电磁辐射,工业设备中的变频器、开关电源产生谐波与开关噪声,谐波次数为3次时,功率达10瓦;电力线载波通信的频谱泄漏占用相邻信道资源,泄漏带宽为1MHz时,干扰功率达5瓦;医疗设备中的核磁共振仪、X光机释放强脉冲电磁场,脉冲宽度为10微秒时,峰值功率达1兆瓦;汽车电子系统中的点火线圈、电机控制器引发宽频带辐射,频带范围为1MHz至100MHz时,辐射功率达100毫瓦,这些干扰虽无主观攻击意图,却因频谱重叠或功率超标对微波通信形成持续性扰动。

2.3 混合复杂环境干扰耦合特性

实际场景中自然与人为干扰往往交织存在,形成复合干扰场。气象条件与地形因素共同作用时,暴雨引发的衰减与山脉导致的多径效应叠加,使信号经历双重路径损耗与相位失真,城市峡谷环境中高楼反射与车辆点火干扰共存,接收信号在空间域与频域同时遭受污染。电磁自然噪声与人为无意干扰耦合时,雷电脉冲与工业谐波在时域上形成脉冲串干扰,太阳活动高峰期电离层扰动与电力线载波泄漏在频域上占据重叠频段,导致干扰抑制算法难以通过单一特征进行分离。多源干扰的时空动态性进一步加剧耦合效应,移动场景中车辆穿越不

同干扰区域时,信号需实时适应快速变化的电磁环境,固定站点在昼夜交替时面临工业设备启停与大气折射率变化的双重影响,这种多维度的干扰耦合对通信系统的自适应能力提出严峻挑战。

3 抗干扰技术在复杂环境中的适配逻辑与应用路径

3.1 自然复杂环境下抗干扰技术适配策略

极端气象环境对微波信号的衰减与散射具有频段依赖性,需根据降雨强度、雾浓度等参数动态调整技术组合。在暴雨频发区域,采用高功率发射与自适应编码技术提升信号穿透力,结合前向纠错编码降低误码率;大雾天气中,通过降低调制阶数与提高接收灵敏度补偿路径损耗,同时启用分集接收技术利用多路径信号增强解调可靠性^[3]。复杂地形环境需结合空间维度优化传输路径,山区场景中部署中继节点构建多跳网络,利用智能天线技术形成指向性波束绕过障碍物,城市峡谷区域则采用波束成形与反射路径规划算法,将建筑物表面反射信号转化为有效传输链路。针对地形引起的多径效应,时域均衡技术与脉冲压缩算法可消除时延扩展,空时编码技术通过多天线联合处理提升信号抗衰落能力。

3.2 人为复杂环境下抗干扰技术适配策略

面对有意干扰的针对性攻击,需构建多层次防御体系。压制式干扰场景下,采用跳频与扩频技术组合,通过快速频点切换与频谱扩展降低被截获概率,结合认知无线电技术实时感知干扰频段并自动规避;欺骗式干扰应对中,引入加密认证与数字签名机制验证信号合法性,利用机器学习算法识别异常指令特征并触发告警。针对无意干扰的频谱污染,自适应滤波技术可动态调整滤波器参数抑制工业谐波,频谱感知与动态频谱分配技术通过实时监测空闲频段实现干扰规避,功率控制技术通过降低发射功率减少对邻近设备的干扰溢出。在电磁兼容性优化方面,采用屏蔽设计与滤波电路降低设备自身辐射,结合电磁拓扑分析预判潜在干扰路径并提前部署防护措施。

3.3 混合复杂环境下抗干扰技术融合应用路径

多域技术协同需建立跨层优化框架,频谱域跳频技术与空域波束成形技术结合,通过空间-频率二维资源分配提升抗干扰鲁棒性;时域自适应调制与链路层路由算法联动,根据信道质量动态调整数据分段大小与传输路径。技术动态调整依赖环境感知与决策引擎,通过部署分布式传感器网络实时采集气象、地形与电磁干扰数据,利用边缘计算节点进行本地化快速决策,中央控制器基于全局信息优化技术参数配置。适配逻辑遵循“感知-评估-决策-执行”闭环,环境变化触发感知模块更新

干扰图谱,评估模块分析技术有效性并生成调整建议,决策模块综合业务优先级与资源约束确定最优方案,执行模块通过软件定义无线电平台实现参数重构。这种动态融合机制使系统能够主动适应混合干扰的时空演变,在保障通信连续性的同时最大化资源利用效率。

4 微波数字通信抗干扰技术体系构建

4.1 抗干扰技术体系核心架构

微波数字通信抗干扰技术体系以分层递进结构为基础,涵盖物理层、链路层与网络层的多维度防护。物理层作为体系基石,聚焦信号处理与传输优化,通过跳频、扩频等频谱域技术实现干扰规避,结合自适应调制编码与波束成形提升信号鲁棒性;时域滤波与脉冲压缩技术消除多径效应与时延扩展,空时编码与智能天线增强空间分集增益^[4]。链路层侧重资源动态管理,自适应路由算法根据干扰分布选择最优传输路径,链路自适应调整技术结合信道质量实时优化数据速率与重传策略,功率控制模块通过动态调节发射功率平衡覆盖范围与干扰抑制需求。网络层构建全局协同框架,认知无线电技术实现频谱感知与智能分配,软件定义网络架构支持快速部署新型抗干扰协议,分布式存储与计算资源为复杂算法提供支撑,形成从信号处理到网络优化的完整闭环。

4.2 体系化抗干扰的协同机制

跨层协同是技术体系高效运行的关键,通过信息交互与联合决策实现能力互补。物理层与链路层联动中,信道状态信息从物理层反馈至链路层,驱动路由算法避开高干扰区域,同时链路层将业务优先级信息传递至物理层,指导调制编码方式选择;网络层与物理层交互时,全局频谱感知结果指导跳频图案设计,避免频段冲突,而网络拓扑变化触发波束成形权值重构,确保空间滤波有效性。多域技术协同方面,频谱-空间联合处理通过跳频与波束成形组合,在频率与空间维度构建双重防护,时域-频域联合均衡利用滤波器组与频谱分析技术,同时抑制多径干扰与窄带噪声。决策层面引入人工智能算法,通过强化学习优化技术参数配置,基于深度学习

的干扰模式识别实现主动防御,形成感知-决策-执行的智能闭环。

4.3 技术体系的可扩展性设计

可扩展性设计保障体系适应未来技术演进与场景变化。模块化架构将各层功能解耦为独立模块,通过标准化接口实现快速替换与升级,例如物理层支持多种调制解调芯片即插即用,链路层允许不同路由协议动态加载。开放接口设计为第三方技术集成提供通道,支持新型抗干扰算法通过软件更新方式融入现有体系,如将量子加密模块接入安全传输链路,或引入太赫兹频段处理模块扩展工作频段。动态资源调度机制根据业务需求与干扰环境弹性分配计算、频谱与能量资源,在突发干扰时优先保障关键业务,低负载阶段释放冗余资源用于干扰监测与学习。这种设计使体系既能兼容现有技术,又能通过软件定义与硬件模块化支持未来5G-A/6G、卫星互联网等新兴场景的抗干扰需求,形成持续演进的技术生态。

结束语

微波数字通信抗干扰技术体系构建意义重大。通过分类阐述抗干扰技术原理,分析复杂环境干扰特性,针对性提出适配策略与融合应用路径,构建分层递进且协同高效的技术体系。该体系具备可扩展性,能兼容现有技术,适应不同场景需求。实际应用中,可根据具体环境与业务需求灵活运用,有效提升通信系统抗干扰能力,保障通信稳定可靠,推动微波数字通信持续发展。

参考文献

- [1]庄礼贤.数字微波通信技术在海上钻井平台的应用研究[J].中国新通信,2024,26(16):1-3.
- [2]符启儒.数字微波传输设备维护策略与抗干扰技术优化研究[J].电视技术,2025,49(3):111-113.
- [3]左玉琦.数字微波通信的优点及其应用研究[J].通信电源技术,2022,39(10):127-129.
- [4]高燕.基于傅里叶变换的大容量数字通信微波抗衰落方法[J].自动化与仪器仪表,2023(3):92-95.