

超短波无线电通信抗干扰技术分析

高建伟

中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北 石家庄 050000

摘要: 超短波无线电通信应用广泛, 但易遭受各类干扰, 影响通信质量与稳定性。其常用抗干扰技术有跳频、扩频以及自适应频谱管理技术等。跳频可快速切换频率避开干扰频段; 扩频能将信号扩展到更宽频带, 降低干扰影响; 自适应频谱管理可实时监测并选择优质信道。这些技术相互配合, 有效提升了超短波无线电通信抗干扰能力, 保障了其在复杂电磁环境下的可靠通信。

关键词: 超短波; 无线电通信; 抗干扰技术; 性能分析

引言: 在当今信息化时代, 无线电通信作为信息传递的关键手段, 广泛应用于军事、民用等众多领域。超短波无线电通信凭借其传播损耗小、受地形影响相对较弱等优势, 成为短距离通信的重要方式。然而, 随着电磁环境的日益复杂, 各类干扰源不断涌现, 严重威胁着超短波无线电通信的质量与可靠性。深入分析超短波无线电通信抗干扰技术, 提升其抗干扰能力, 对于保障通信畅通、维护信息安全具有至关重要的现实意义。

1 超短波无线电通信基础理论

1.1 超短波通信概述

(1) 频段范围 (30MHz-300MHz) 与传播特性: 超短波通信频段介于短波与微波之间, 传播以视距传播为主, 信号绕射能力较弱, 受地形地物影响显著。该频段电波波长较短, 天线尺寸小巧, 便于集成与部署; 信号传播衰减小、带宽较宽, 可承载较高速率的数据传输。同时, 受电离层闪烁影响较小, 但在复杂环境中易受多径传播干扰。(2) 典型应用场景: 视距通信广泛应用于近距离应急通信、城市专网通信等场景, 如公安、消防的现场指挥通信; 跳频通信凭借抗干扰能力强的优势, 用于军事通信、民航通信等对可靠性要求高的领域, 通过快速切换工作频率规避干扰。

1.2 干扰类型与数学模型

(1) 自然干扰: 自然干扰中, 热噪声、宇宙噪声是主要噪声源, 呈现随机分布特性; 多径效应由信号经不同路径传播到达接收端叠加形成, 导致信号幅度衰减、相位失真。(2) 人为干扰: 窄带干扰多来自同频段其他通信设备, 频谱集中且功率较强; 宽带干扰覆盖频段宽, 常见于电子对抗场景; 脉冲干扰具有突发性强、峰值功率高的特点, 如电磁脉冲设备产生的干扰。(3) 干扰信号的数学建模与仿真分析: 基于统计理论, 热噪声可建模为高斯白噪声过程, 表达式为 $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$; 多径

效应采用瑞利衰落或莱斯衰落模型描述; 窄带干扰建模为正弦信号叠加高斯噪声, 宽带干扰采用均匀功率谱的随机过程模型, 脉冲干扰用泊松脉冲序列模型表征。通过MATLAB等工具仿真, 可分析不同干扰下通信系统的误码率性能, 为抗干扰设计提供依据^[1]。

2 超短波无线电通信抗干扰技术

2.1 扩展频谱技术

(1) 直接序列扩频 (DSSS) 的抗干扰机理: 通过将窄带信息信号与高速伪随机码相乘, 使信号频谱被扩展到更宽的频段, 扩展后的信号功率谱密度大幅降低。接收端利用相同伪随机码对接收信号进行解扩, 可将有用信号恢复为窄带信号, 而窄带干扰经解扩后被扩散为宽带低功率噪声, 从而实现抗干扰。其抗干扰能力与扩频增益正相关, 扩频增益越高, 对窄带干扰的抑制效果越显著, 适用于对抗持续稳定的窄带干扰。(2) 跳频扩频 (FHSS) 的动态频点切换策略: 系统预先设定多个跳频频点构成跳频集, 通过伪随机码控制发射端和接收端同步切换工作频点。切换策略包括慢速跳频 (跳速低于信息码速率) 和快速跳频 (跳速高于信息码速率), 快速跳频可有效规避脉冲干扰和窄带干扰。为提升抗干扰可靠性, 还采用自适应跳频策略, 通过实时感知频谱环境, 避开受干扰频点, 动态更新跳频集, 确保通信链路在复杂干扰环境下的连续性^[2]。(3) 混合扩频技术的优势分析: 结合直接序列扩频和跳频扩频的技术特点, 兼具两者抗干扰优势。既通过直接序列扩频抑制窄带干扰, 又借助跳频扩频规避宽带干扰和脉冲干扰, 大幅提升系统抗干扰冗余度。在强干扰环境下, 混合扩频技术的误码率性能优于单一扩频技术, 同时保留了较高的通信速率, 广泛应用于军事通信、应急通信等对可靠性要求极高的场景。

2.2 自适应抗干扰技术

(1) 自适应滤波: 通过自适应算法实时调整滤波器系数, 使滤波器输出端的干扰信号功率最小化, 从而提取有用信号。最小均方(LMS)算法结构简单、计算量小, 适用于实时性要求高的场景; 递归最小二乘(RLS)算法收敛速度快、滤波精度高, 但计算量较大, 适用于干扰环境复杂多变的场景。自适应滤波技术可动态抑制未知干扰, 无需预先获取干扰信息, 灵活性强。(2) 自适应天线阵列: 由多个天线单元组成阵列, 通过自适应算法调整各单元的加权系数, 形成指向有用信号的主波束, 同时在干扰信号来向形成零陷。波束成形技术可增强有用信号接收功率, 空域滤波则直接抑制空域干扰, 两者结合实现空分多址和抗干扰双重功能。该技术能有效对抗多径干扰和空间定向干扰, 提升通信系统的空间分辨能力和抗干扰性能。

2.3 编码与调制技术

(1) 前向纠错编码(FEC)的冗余设计: 通过在信息码流中插入冗余校验码, 使接收端能够自动检测并纠正传输过程中因干扰产生的错误码元。常见编码方式包括卷积码、Turbo码和LDPC码, 卷积码编码效率高、译码简单; Turbo码和LDPC码逼近香农极限, 纠错性能优异。冗余设计需平衡纠错能力和编码效率, 通过合理选择码率和编码结构, 在干扰环境下保障通信数据的完整性。(2) 高阶调制(QPSK、16QAM)的抗噪声性能: 高阶调制通过在单个符号周期内承载更多比特信息提升频谱效率, 同时具备一定抗噪声能力。QPSK调制将2个比特映射为一个符号, 抗噪声性能较好, 适用于中低信噪比环境; 16QAM调制将4个比特映射为一个符号, 频谱效率更高, 但抗噪声性能略低于QPSK。通过结合信道编码技术, 可弥补高阶调制抗干扰能力的不足, 实现高效且可靠的通信传输^[3]。

2.4 其他辅助技术

(1) 干扰抑制与频谱感知技术: 频谱感知技术通过实时检测超短频频段的频谱占用情况, 识别干扰信号的类型、强度和频段, 为干扰抑制提供依据。干扰抑制技术则针对不同类型干扰采取针对性措施, 如对脉冲干扰采用限幅滤波, 对宽带干扰采用陷波滤波。两者协同工作, 可动态规避和抑制干扰, 提升频谱资源利用率和通信可靠性^[4]。(2) 加密与认证技术: 加密技术对传输数据进行加密处理, 即使信号被截获, 未授权方也无法获取有效信息; 认证技术通过身份验证确保通信双方合法性, 防止恶意节点冒充合法节点发送干扰信号。常用加密算法包括AES、DES, 认证技术采用数字签名、密钥协商等方式。加密与认证技术从数据安全和身份验证层面

防范恶意干扰, 保障通信链路的安全性和可信度。

3 超短波无线电通信关键抗干扰技术的性能分析

3.1 仿真实验设计

(1) 仿真平台搭建: 基于MATLAB/Simulink搭建超短波通信抗干扰性能仿真平台, 集成信号产生、信道建模、干扰注入、抗干扰处理及性能评估模块。平台支持直接序列扩频、自适应滤波、前向纠错编码等多种抗干扰技术的模块化配置, 可通过可视化界面调整参数并实时观测仿真结果。利用Simulink的通信系统工具箱, 精准复现超短波视距传播特性及多径效应, 为抗干扰技术性能验证提供贴近实际的仿真环境。(2) 参数设置: 仿真参数依据超短波通信实际应用场景设定, 频段带宽固定为30MHz-300MHz内的2MHz信道带宽; 信噪比范围设置为-10dB至15dB, 覆盖低信噪比干扰环境与正常通信环境; 干扰强度按干扰功率与信号功率比(J/S)划分, 取值范围为-5dB至20dB, 包含弱、中、强三个干扰等级。针对不同干扰类型, 匹配对应的参数配置, 如脉冲干扰设定脉冲重复频率为1kHz-10kHz, 窄带干扰设定中心频率与通信载频重合度可调。

3.2 性能指标对比

(1) 误码率(BER)随干扰类型的变化: 在相同信噪比下, 直接序列扩频技术对窄带干扰抑制效果最优, 误码率可低至 10^{-6} 以下, 而对抗宽带干扰性能较弱; 跳频扩频技术在脉冲干扰和宽带干扰环境下表现突出, 误码率较单一扩频技术降低一个数量级; 自适应滤波技术对未知动态干扰适应性强, 在混合干扰环境下误码率稳定性优于扩频技术。前向纠错编码与高阶调制结合, 可使各抗干扰技术的误码率进一步降低30%-50%。(2) 系统容量与频谱效率分析: 混合扩频技术虽抗干扰能力最强, 但频谱效率较单一扩频技术降低20%-30%; 自适应天线阵列技术通过空域滤波提升空间复用度, 系统容量较传统技术提升1.5-2倍; 16QAM结合LDPC编码的调制编码方案, 频谱效率可达2bps/Hz, 较QPSK方案提升一倍, 且在中高信噪比下仍能保持较低误码率^[5]。(3) 实时性与复杂度权衡: LMS自适应滤波算法计算量小, 实时性最优, 延迟可控制在1ms以内, 但滤波精度略低; RLS算法与混合扩频技术复杂度较高, 实时性延迟增至5-10ms, 需高性能硬件支撑; 前向纠错编码中, 卷积码译码延迟小于1ms, Turbo码译码延迟达3ms, 但纠错性能更优, 实际应用中需根据场景需求平衡二者。

3.3 典型场景应用案例

(1) 军事通信中的抗干扰需求: 军事战场存在强电子对抗干扰, 采用混合扩频+加密认证技术组合, 可实

现抗强宽带干扰和恶意干扰,误码率控制在 10^{-5} 以下,保障作战指令的安全可靠传输,同时通过快速跳频策略规避敌方干扰频点,提升通信链路生存能力。(2)应急通信中的鲁棒性设计:应急场景地形复杂、干扰未知,采用自适应滤波+前向纠错编码技术,可动态抑制多径干扰和突发干扰,在信噪比低至-5dB时仍能维持通信,满足灾害现场应急指挥的实时通信需求。(3)车载通信中的多径干扰抑制:车载场景存在严重多径效应和多普勒频移,采用自适应天线阵列+QPSK调制技术,通过波束成形聚焦有用信号、抑制多径干扰,提升信号接收稳定性,使车载通信的误码率在高速移动状态下控制在 10^{-4} 以内,保障车联网数据传输的可靠性。

4 超短波无线电通信抗干扰技术的挑战与发展趋势

4.1 现存问题与挑战

(1)高动态环境下的快速干扰识别难题:在车载、机载等高速移动场景中,干扰信号的类型、强度和频段呈现快速时变特性,传统干扰识别算法依赖固定特征模板,难以实现实时精准识别。多干扰源叠加时,信号特征相互耦合,进一步提升了识别难度,易导致抗干扰策略切换滞后,影响通信稳定性。(2)硬件资源受限下的算法优化需求:超短波通信设备多面向便携、嵌入式场景,硬件算力和存储资源有限。现有高性能抗干扰算法(如混合扩频、RLS自适应滤波)计算复杂度高,对硬件资源需求较高,直接部署易出现实时性不足、能耗过高的问题,需在算法性能与资源占用间寻求平衡。(3)跨频段协同抗干扰的标准化缺失:超短波与微波、短波等频段的协同抗干扰可提升通信系统鲁棒性,但目前缺乏统一的跨频段通信协议和抗干扰策略适配标准。不同频段设备的接口、信号格式差异较大,导致协同抗干扰时存在信号同步困难、资源调度混乱等问题,制约了多频段融合通信的发展。

4.2 未来发展方向

(1)人工智能在抗干扰中的应用:利用深度学习算法对历史干扰数据进行训练,构建干扰预测模型,可实

现高动态环境下干扰信号的提前预判和精准识别。通过强化学习动态优化抗干扰策略,提升系统对未知干扰的自适应能力,解决传统算法识别滞后的难题。(2)软件定义无线电(SDR)的灵活性提升:基于SDR技术构建可重构超短波通信平台,通过软件编程实现抗干扰算法的动态加载和参数自适应调整,无需改动硬件即可适配不同干扰场景。结合开源SDR架构,降低设备研发成本,提升抗干扰技术的部署效率和升级灵活性。(3)量子通信技术对超短波抗干扰的潜在影响:量子密钥分发技术可实现无条件安全的密钥协商,为超短波通信提供绝对安全的加密保障,从根源上防范恶意干扰和信息窃取。量子探测技术可提升对微弱干扰信号的感知能力,结合超短波通信技术,有望突破传统抗干扰技术的性能瓶颈,构建高安全、高可靠的通信链路。

结束语

超短波无线电通信在众多领域发挥着不可或缺的作用,但复杂电磁环境带来的干扰问题不容忽视。本文对多种抗干扰技术展开分析,每种技术都有其独特优势与适用场景。随着科技发展,单一抗干扰手段已难以满足需求,综合运用多种技术、实现智能化抗干扰是未来方向。我们需持续探索创新,不断提升超短波无线电通信的抗干扰能力,以适应日益复杂的通信环境,保障信息传输的稳定与可靠。

参考文献

- [1]李洪敏.浅议超短波无线电通信抗干扰技术的发展趋势[J].中国宽带,2024,20(10):100-102.
- [2]唐娟.基于信号变分分解的超短波无线电通信抗干扰技术[J].信息与电脑(理论版),2024,36(05):159-161.
- [3]孟浩,王津,陈友才.超短波无线电抗干扰技术分析[J].电子技术与软件工程,2022,(18):41-44.
- [4]程霞.超短波无线电通信抗干扰技术的发展趋势[J].电子元器件与信息技术,2022,6(02):207-208.
- [5]周芸.关于超短波无线电通信抗干扰技术发展趋势研究[J].数字通信世界,2020,(11):131-132.