 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i9.7440

Anti-jamming technology and implementation method of frequency hopping communication in complex electromagnetic environment

Liang Hu

China Electronics Technology Group Corporation 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract

Frequency-hopping communication, as a crucial form of spread spectrum technology, demonstrates significant value in high-reliability scenarios such as military and emergency communications due to its rapid frequency switching and dispersed transmission characteristics. However, the complex electromagnetic environment characterized by spectrum congestion, dense interference, and intelligent adversary tactics poses challenges including frequency locking and synchronization interference. This paper analyzes the features and interference types in complex electromagnetic environments, elaborates on the principles, advantages, and limitations of frequency-hopping communication, and proposes anti-interference strategies such as adaptive frequency-hopping sequence optimization, intelligent spectrum sensing, interference suppression, coordinated frequency-hopping, and multi-antenna systems. A cognitive radio and deep learning-based implementation method is developed. Through engineering practice, hardware architecture, signal processing workflows, and algorithm optimization are explored. Research findings indicate that the integration of multiple technologies can significantly enhance system stability under strong interference, providing valuable references for subsequent design and application.

Keywords

frequency hopping communication; anti-jamming technology; complex electromagnetic environment; spectrum sensing; cognitive radio

复杂电磁环境下跳频通信抗干扰技术及实现方法

胡亮

中国电子科技集团公司第十研究所，中国 · 四川 成都 610036

摘　要

跳频通信作为扩频通信的重要形式，凭借频率快速切换与分散传输的特点，在军事、应急等高可靠通信场景中具有重要价值。然而，复杂电磁环境下频谱拥挤、干扰密集及手段智能化，使其面临频点锁定、同步干扰等挑战。本文分析了复杂电磁环境特征与干扰类型，阐述跳频通信原理及其优势与局限，提出自适应跳频序列优化、智能频谱感知、干扰抑制、协同跳频和多天线等抗干扰策略，并构建基于认知无线电与深度学习的实现方法。结合工程实践探讨硬件架构、信号处理流程与算法优化，研究表明多技术融合可显著提升系统在强干扰下的通信稳定性，为后续设计与应用提供参考。

关键词

跳频通信；抗干扰技术；复杂电磁环境；频谱感知；认知无线电

1 引言

无线通信在信息化社会与军事体系中至关重要，跳频通信凭借频率切换和能量分散降低窄带干扰与截获风险。然而，频谱紧张与智能干扰的发展，使其在复杂电磁环境下易遭频点锁定、同步受扰和可用频点减少等问题。该环境中干扰种类多、变化快，对系统实时性与鲁棒性要求极高。近年来，数字信号处理、认知无线电、人工智能及多天线等技术为跳频通信的抗干扰提供了新思路。通过频谱感知、智能调度与自适应分配，可在强干扰下保持高质量通信。本文从理论基础、干扰机制、技术路径到工程实现，系统研究复杂电磁环境下跳频通信的抗干扰技术与方法，为相关应用提供技术参考。

2 复杂电磁环境与跳频通信的基本原理

2.1 复杂电磁环境的特征与干扰类型

复杂电磁环境是指在有限频谱资源中，多种通信、雷达、导航、遥测等信号与多类干扰信号共存的场景，其特点包括频谱利用率高、信号密度大、干扰手段多样化且变化频繁。在此环境中，干扰可分为有意干扰、无意干扰和复合干扰三

【作者简介】胡亮（1984–），男，中国江西抚州人，硕士，工程师，从事从事通信研究。

类。有意干扰如扫频干扰、窄带跟踪干扰、噪声调幅 / 调频干扰及脉冲干扰，通常针对性强、信号功率高，并可根据目标通信模式调整干扰策略；无意干扰源自其他通信系统的邻道泄漏、谐波干扰及设备非线性失真等，虽无直接破坏意图，但会对接收端的解调精度和通信稳定性造成影响；复合干扰则表现为多种干扰信号叠加并随时间动态变化，既可能来自同一干扰源的多种形式信号，也可能由不同设备、系统产生的干扰共同作用。这种干扰环境复杂度高、时变性强，对跳频通信系统的频谱选择、信道估计及信号恢复提出了更严苛的要求。

2.2 跳频通信的基本原理

跳频通信通过在多个预先设定的载频上按照特定规律快速切换来传输信息，其核心思想是分散信号能量，降低单一频点长期暴露于干扰的概率。跳频速率可分为慢跳和快跳两种模式：慢跳模式下，载频切换速度低于符号速率，每个频率上可传输多个符号；快跳模式则在一个符号周期内可发生多次频率切换，大幅提高了抗窄带干扰能力。系统主要由跳频序列生成模块、频率合成器、发射端调制器、接收端同步与解调模块等部分构成。其中，跳频序列的随机性、不可预测性以及与通信双方的同步精度，直接决定了系统在干扰和截获条件下的表现。为提升性能，现代跳频系统常引入加密算法与伪随机序列生成机制，使序列对外部观测更难预测，进一步增强安全性与抗干扰能力。

2.3 跳频通信在复杂环境中的优势与局限

在面对窄带干扰时，跳频通信能够通过频率切换将受干扰时间比例降低至极低水平，从而显著提升信噪比和传输可靠性。其频率跳变特性也有效分散了能量，增强了信号的保密性与抗截获能力，尤其在敌对环境中能延长链路存活时间。然而，在频谱紧张、干扰密度高或干扰具有窄带跟踪能力的情况下，跳频通信可能面临频点被快速锁定、序列预测精度提升、系统同步易丢失等风险。同时，快速变化的干扰模式会使传统固定序列的跳频策略失去优势。因此，需要引入自适应频率分配、协同跳频、多天线空间分集以及干扰规避等技术，与跳频机制形成互补，从而有效应对复杂电磁环境下的多源、多类型干扰挑战。

3 复杂电磁环境下的跳频通信干扰机制分析

3.1 扫频与窄带跟踪干扰的影响机理

扫频干扰是一种常见且高效的有意干扰方式，其通过在一定带宽范围内以较快速度连续扫描，将干扰信号依次覆盖跳频通信系统可能使用的各个频点。这种干扰可在短时间内对多个载频造成影响，尤其是在跳频速率较低或频谱较窄的系统中，效果尤为显著。窄带跟踪干扰则更具针对性，它通过干扰机的信号检测与分析功能，实时捕获并跟踪通信方的跳频模式，在目标切换至某一频点后迅速施加高功率干扰。这类干扰常借助先进的频谱分析和锁相技术，反应速度极快，可在毫秒甚至微秒级别完成锁定与干扰施放。由于传统固定跳频序列的可预测性较高，这两类干扰往往能够较快地掌握频率变化规律，从而持续有效地抑制通信信号，使接收端出现误码率急剧上升、链路中断等现象。因此，在应对此类干扰时，必须考虑引入高度随机化、实时更新的跳频序列以及频点伪装和混淆技术，以提升规避能力。

3.2 宽带与脉冲干扰的干扰特性

宽带干扰的主要特征是覆盖范围大，其干扰信号带宽可与跳频系统的整个工作带宽相当，甚至完全覆盖，使得跳频机制的频率规避优势大幅削弱。此类干扰通常采用高功率噪声或调制信号，能在频域内形成均匀的干扰背景，使所有跳频频点都处于较低的信噪比水平下，导致系统整体性能下降。相比之下，脉冲干扰以瞬时高功率脉冲的形式发射干扰信号，时间占空比低但瞬时能量极高，足以在短时间内严重破坏信号传输。对于快跳系统而言，脉冲干扰对其同步与捕获环节影响尤为明显，一旦在关键符号传输或同步字期间施加干扰，可能导致接收端失步或频繁重同步，从而降低有效吞吐量。更复杂的是，宽带干扰和脉冲干扰还可能叠加使用，形成既有大范围覆盖又有瞬时冲击的复合威胁，对传统滤波和频率规避手段提出了更高要求。

3.3 智能干扰与多源干扰的复合威胁

随着人工智能与信号处理技术的发展，智能干扰成为复杂电磁环境中的新型威胁。这类干扰借助机器学习、深度神经网络和信号识别算法，对跳频通信的频谱特征进行实时分析与建模，能够在较短时间内学习和预测跳频模式，实现高度精确的定向干扰。例如，基于长短期记忆网络（LSTM）的干扰机可通过历史频率序列预测未来的跳频频点，从而提前锁定并施加干扰。同时，在实际场景中，智能干扰往往并非单一存在，而是与其他干扰类型叠加，形成多源、多类型的复合干扰环境。在这种情况下，系统不仅要应对不同频域、时域特性的干扰信号，还要处理它们在时间上错落叠加、相互掩盖的复杂效应。这类环境下，传统单一抗干扰策略效果有限，必须采用多技术融合的整体防御体系，如联合频谱感知、多天线空间分集、信号编码增强以及动态功率控制等，才能在多重威胁中维持通信质量与链路稳定。

4 抗干扰技术路径研究

4.1 自适应跳频序列优化技术

自适应跳频序列优化技术旨在根据电磁环境的实时变化，对跳频序列进行动态调整，使通信频点能够有效避开干扰密集区。在复杂电磁环境中，干扰的频率分布往往随时间波动，固定的跳频序列难以保持长期有效性。通过引入频谱感知与干扰强度评估模块，可以在通信过程中实时获取各频点的干扰状况，并将这些信息输入到优化算法中进行频率选择与序列更新。遗传算法、粒子群优化等智能优化方法能够在多维搜索空间中快速找到适合当前环境的频率组合，同时

保持序列的随机性与不可预测性，防止被干扰方推测出跳频规律。此外，优化过程中还需考虑通信双方的同步需求，通过合理的序列生成和更新机制，确保在动态调整时不影响数据传输的连续性与稳定性。工程实现中，可结合 FPGA 或高速 DSP 平台，实现毫秒级甚至微秒级的序列更新速度，使系统能够在干扰模式突变时迅速做出响应，从而显著提升抗干扰性能。

4.2 智能频谱感知与干扰规避

智能频谱感知技术是抗干扰的核心手段之一，其基于认知无线电理念，通过对频谱使用状态和干扰信号分布的实时监测，动态调整通信频点选择。与传统频谱扫描不同，智能频谱感知不仅能获取当前频谱占用情况，还能利用深度学习模型对干扰趋势进行预测，从而提前采取规避措施。例如，通过卷积神经网络（CNN）提取频谱能量分布特征，结合循环神经网络（RNN）对时序数据进行分析，可以准确预测未来时刻某一频段的干扰概率。在此基础上，系统可在干扰发生前将通信跳转至相对干净的频段，实现主动规避而非被动应对。该方法特别适合干扰变化频繁且强度不均的环境。此外，智能频谱感知还可与地理信息和历史干扰数据库结合，形成环境特征感知与长期策略优化机制，使跳频通信在不同区域、不同时间段均能保持较高的可用性与稳定性。

4.3 信号处理与干扰抑制技术

信号处理与干扰抑制技术通过算法手段直接在接收端削弱干扰分量、增强有用信号，从而提高系统的抗干扰能力。自适应滤波器可根据输入信号与参考信号的相关性，动态调整滤波系数以消除干扰分量，特别适用于窄带干扰抑制。空时自适应处理（STAP）利用天线阵列的空间分集特性，将空间滤波与时间滤波相结合，在空域和时域同时抑制干扰，对多源干扰和干扰信号方向可分辨的场景效果显著。此外，多用户检测技术可以在多址通信环境中区分并恢复目标信号，降低多址干扰对通信质量的影响。在工程应用中，这些方法往往与前端低噪声放大、频域均衡、信道估计等模块配合使用，形成多层级的干扰抑制链路。通过优化算法复杂度和硬件实现方式，可以在保证处理性能的前提下减少计算延迟，从而在实时通信中实现高效的干扰抑制与信号增强。

5 系统实现方法与工程应用

5.1 基于认知无线电的抗干扰架构设计

基于认知无线电的架构赋予跳频通信自适应感知与动态优化能力，由频谱感知、跳频序列生成、干扰检测决策和信号处理等模块构成。频谱感知模块实时获取频谱占用与干扰分布，序列生成模块依据感知结果和规则动态调整跳频序列，干扰检测模块结合干扰信息和链路质量快速决策，信号处理单元执行滤波、均衡、调制解调等操作。在硬件实现上，采用FPGA+DSP混合架构可兼顾高速并行处理与灵活控制，实现毫秒级响应；模块化和可重构设计则方便不同任务快速切换算法与配置，提高系统适应性。

5.2 基于机器学习的干扰识别与预测

机器学习可提升干扰识别与预测的准确性与实时性。卷积神经网络（CNN）可提取干扰信号的时频特征，长短期记忆网络（LSTM）可分析时间序列的长期依赖，从而预测干扰趋势。该组合模型可在极短时间内完成干扰分类与频段干扰概率估计，为跳频策略提前调整提供依据。工程实现中，可将模型部署在嵌入式 GPU 或高性能 DSP 中进行边缘计算推理，避免延迟与带宽占用，并通过在线微调保持在不同环境下的高准确率。借助这种机制，系统不仅能在干扰发生时迅速响应，还能提前规避，显著提高通信稳定性与抗干扰性能。

6 结语

复杂电磁环境对跳频通信的稳定性与安全性提出了前所未有的挑战。通过将自适应跳频、频谱感知、干扰抑制、多天线协同与智能预测等技术有机结合，能够显著提升系统的抗干扰能力与通信质量。未来，随着人工智能和认知无线电技术的持续发展，跳频通信的抗干扰能力将在更广泛的场景中得到验证与应用，为高可靠通信提供坚实保障。

参考文献

[1] 马松,王家豪,张蔺,等.基于深度学习的非扩跳频通信体制窄带干扰抑制技术[J].电子科技大学学报,2024,53(06):862-870.

[2] 郑重,管芸笛,李文吉,等.多头注意力机制的卫星通信抗干扰波形决策方法[C]//中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会.第十八届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集.中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部;国家航天局卫星通信系统创新中心;,2024:228-234.

[3] 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.

[4] 夏重阳,吴晓富,靳越.一种面向宽带跳频双动作的智能抗干扰决策算法[J].电讯技术,2024,64(09):1467-1473.