

制协议（如 APS 自动保护切换）与路由策略同步更新，确保切换过程的准确性和最小业务抖动。通过仿真分析表明，级联保护机制显著提高了多故障情况下的服务恢复能力，同时对冗余资源的占用更为合理，有效降低长期运维压力。

6 仿真实验与性能评价

6.1 仿真平台与参数说明

为验证上述拓扑优化与保护机制设计的有效性，构建仿真平台成为关键环节。本研究依托 NS3 与自研 SDH 模拟模块，综合网络拓扑信息、业务流量矩阵、物理链路参数与节点能力设定进行建模。仿真网络涵盖不同等级的节点布局，设定核心节点 8 个、聚合节点 16 个、接入节点 32 个，总链路数超过 100 条，分别模拟不同流量密度下的传输状态与故障响应过程。

在参数设定方面，链路延迟区间设定在 0.5ms 至 5ms 之间，带宽设置为 STM4 至 STM64 不等。保护机制仿真覆盖 SNCP、BLSR、链路备份与级联切换机制，故障事件包括单点链路断裂、节点故障、区域级中断三类。主要评估指标包括：1) PST（保护切换时间）；2) 网络整体可用性（Availability）；3) 冗余资源利用率；4) 恢复路径效率；5) 配置复杂度评分等。所有测试均重复运行 10 次以上，保证结果稳定性。

6.2 优化前后比较

仿真结果显示，经拓扑与保护机制优化后，网络整体表现出现显著改善。在资源配置方面，优化模型下冗余链路配置更为合理，平均资源利用率由原有的 67% 提升至约 87%，冗余资源占比下降 12%，反映出链路配置的精准度大幅提高。在故障响应方面，BLSR 与级联机制协同作用使得平均故障切换时间从原先约 120ms 降至 47ms，部分核心路径甚至实现近实时（小于 30ms）恢复。

在可用性层面，全年平均网络可用性达到了 99.9992%，高于行业标准的“5 个 9”目标，表现出极高的服务连续性保障能力。同时，优化方案在总体建设成本上增加幅度控制在 6% 以内，在可接受范围之内，且未来可通过规模部署实现边际成本下降。综合对比说明，本研究提出的协同优化策略在保障业务连续性、提升网络鲁棒性及降低资源浪费方面具备明显优势。

7 部署建议与未来展望

7.1 实施步骤建议

实施本方案需遵循系统化推进路径，逐步实现从规划到落地的闭环管控。首要阶段为数据收集与流量分析，通过部署流量监测设备采集网络运行数据，建立业务流量热度图，并与地理信息系统（GIS）进行映射，明确核心区域与瓶颈路径。随后构建仿真平台，应用上述拓扑优化模型对现网架构进行模拟验证，形成初步优化建议方案。

中期阶段应分区域开展试点部署。选择典型区域（如

业务集中区或网络高频故障区）进行分批次升级改造，部署优化后的节点链路和保护策略，并实施性能评估。同时加强网管系统与调度平台的联动，实时记录故障响应效率与业务恢复能力变化。在试点结果达标后，逐步扩展推广范围，实现网络结构的整体优化。项目后期应设定常态化性能监控机制，确保优化持续有效，并建立滚动优化机制应对业务变化。

7.2 跨网融合与自主升级

未来光通信网络将持续迈向 IP 化、智能化与融合化。SDH 网络虽稳定可靠，但其静态资源配置与透明传输模式在应对弹性调度、多业务融合方面显露短板。因此建议逐步引入新型分组交换技术如 MPLSTP、OTN，以提升网络智能调度与多服务支持能力。在演进过程中，应构建 SDH 与分组交换系统的协同演进机制，通过统一控制面和管理面实现资源协调、故障联动和服务质量保障。

此外，推进自动化网络维护体系建设，如基于 AI 的故障预测与智能调度技术，在运维层实现自学习与策略推演，将大幅提高网络自主适应与灾备响应能力。面向未来业务场景（如 5G 承载、工业控制、应急通信等），需构建具备高带宽、低时延、高鲁棒性的统一承载平台，为 SDH 网络转型升级提供可持续路径。

8 结语

本文面向现有 SDH 光通信网络在结构布局与保护机制方面的典型问题，系统提出了一套拓扑优化与多层次可靠性提升的协同策略。研究内容涵盖节点选址、链路配置、混合保护机制与级联故障响应等关键模块，建立了理论模型并进行了仿真实证。结果表明，通过优化设计可在保持网络稳定性的同时显著提高资源利用效率与业务恢复能力，在多个性能维度均优于传统设计模式。

更进一步，本研究在部署建议方面给出了具有可操作性的步骤指导，涵盖从流量分析、模型建立到试点实施与全网推广的完整链路，同时结合行业发展趋势展望了 SDH 网络未来的演进方向。在实现路径上提出跨网融合、自主升级及智能运维等策略，为运营商平衡成本、性能与扩展能力提供参考。

随着光通信业务的持续深化与新兴技术的不断涌现，传统 SDH 网络的改造与融合将成为网络演进的关键命题。未来应继续深入挖掘网络结构优化与服务保障的协同空间，推动 SDH 网络向高弹性、智能化、自适应方向发展，以应对复杂多变的通信需求挑战。

参考文献

- [1] 梁玉亭.SDH网络性能优化算法研究[D].电子科技大学,2010.
- [2] 沈杨.电力系统SDH光纤传输网的优化策略及应用[D].华北电力大学(北京),2015.
- [3] 金梦颖.基于MSTP的SDH传输网应用研究[D].华北电力大学,2015.

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