

基于信号处理的通信系统抗干扰技术研究与实践

周海全

中国电信股份有限公司南宁分公司 广西 南宁 530000

摘要: 无线通信技术快速普及, 通信环境愈发复杂, 电磁、人为等干扰严重影响通信系统的传输质量、可靠性与安全性, 是通信系统向高速、高精度、广覆盖发展的核心阻碍。信号处理技术是抗干扰设计核心支撑, 能检测、分析、变换与优化信号以抑制干扰、提取有用信号。本文围绕抗干扰需求, 构建典型干扰模型、明确评估指标, 研究多种抗干扰关键技术, 结合编码扩频与人工智能优化效果, 设计软硬件架构与算法, 提出联合优化策略, 经理论实践提升抗干扰性能, 为通信系统稳定运行提供支撑。

关键词: 信号处理; 通信系统; 抗干扰技术; 多域协同; 人工智能

引言: 5G、物联网、卫星通信等技术飞速发展, 通信系统广泛应用于国防、民生、工业等领域, 对传输可靠性与抗干扰能力要求提高。当前通信环境多干扰、强耦合、动态变化, 自然、人为、同频等干扰易致误码率升高、传输速率下降、信号中断, 甚至危及核心领域通信安全。信号处理技术是应对干扰核心手段, 多维度分析优化信号可抑制干扰、提取有用信号。本文聚焦该技术, 研究干扰模型、关键技术及实现方案, 为通信系统稳定运行提供保障, 有重要理论与工程意义。

1 通信系统干扰模型与性能分析

1.1 典型干扰类型建模

干扰类型直接影响抗干扰策略的选择。窄带干扰(NBI)通常表现为单频或多频连续波, 可通过频域能量集中特性建模; 脉冲干扰(PI)具有瞬时高功率特征, 其时域波形可建模为高斯脉冲或矩形脉冲序列; 多径干扰源于信号反射与折射, 导致接收信号幅度与相位随机变化, 需通过瑞利衰落或莱斯衰落模型描述; 人为恶意干扰(如扫频干扰、部分频带噪声干扰)则需结合干扰策略动态建模。例如, 扫频干扰可通过时变频率参数模拟, 部分频带干扰可通过频域掩码函数表征。建立精准的干扰模型是评估抗干扰技术有效性的前提^[1]。

1.2 干扰对通信系统的影响

干扰通过改变接收信号的信噪比(SNR)与信干比(SIR), 导致误码率(BER)上升甚至通信中断。窄带干扰会覆盖目标频段, 使有用信号被噪声淹没; 脉冲干扰通过瞬时高功率破坏符号同步, 引发突发错误; 多径干扰导致符号间干扰(ISI), 限制数据传输速率; 恶意干扰通过动态调整干扰参数, 使传统固定滤波方法失效。例如, 在QPSK调制系统中, 当SIR低于10dB时, BER可能从 10^{-5} 激增至 10^{-1} , 严重威胁通信可靠性。此外, 干扰还

会影响系统容量与频谱效率, 迫使通信方降低发射功率或切换频段, 增加运营成本。

1.3 抗干扰性能评估指标

评估抗干扰技术需量化指标支撑。误码率(BER)与误帧率(FER)直接反映通信质量, 是核心评估参数; 信干噪比改善量(ISNR)衡量干扰抑制前后信号质量的变化; 收敛时间与计算复杂度评估算法实时性, 适用于高速移动场景; 鲁棒性指标(如对抗参数变化的敏感度)反映技术适应性; 频谱效率与能量效率则从资源利用角度评估方案优劣。例如, 在跳频通信系统中, 抗干扰性能需综合跳频图案随机性、跳速及干扰避让能力评估。建立多维度评估体系, 可避免单一指标导致的片面性, 为技术优化提供全面依据。

2 基于信号处理的抗干扰关键技术

2.1 时域抗干扰技术

时域抗干扰技术依据信号时域特征, 分析、滤波与优化通信信号时域波形来抑制干扰。它算法简单、实时性强、硬件成本低, 适用于脉冲、突发等时域特征明显的干扰。时域滤波是核心方法, 分线性和非线性滤波。线性滤波设计低通、高通或带通滤波器, 保留有用信号时域频率范围, 滤除干扰, 自适应时域滤波器还能根据干扰动态变化实时调整系数, 增强适应性。脉冲干扰抑制是重点, 采用脉冲检测与消隐算法, 通过阈值判断确定脉冲干扰时刻和幅值, 对干扰时段信号消隐或插值修复, 避免破坏有用信号且保留其时域信息^[2]。此外, 时域信号增强技术通过叠加有用信号、调整增益提升其幅值, 降低干扰影响, 优化信噪比, 与滤波技术结合, 能显著提升时域抗干扰效果, 适用于弱信号、强脉冲干扰的通信场景。

2.2 频域抗干扰技术

频域抗干扰技术基于信号的频谱特性,通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,分析有用信号与干扰信号的频谱分布差异,采用频谱屏蔽、频率规避、频域滤波等方式,实现干扰抑制,适用于窄带干扰、同频干扰等频谱特征突出的干扰类型。频域滤波技术与时域滤波技术相辅相成,通过设计频域陷波滤波器,精准抑制窄带干扰所在的频率分量,同时保留有用信号的频谱特征,避免对有用信号造成损伤,相较于时域滤波,其对窄带干扰的抑制精度更高。频率规避技术通过实时检测信道中的干扰频率,动态调整有用信号的传输频率,避开干扰频段,实现干扰规避,该技术需结合频谱检测算法,确保频率调整的实时性与准确性,适用于干扰频率固定或缓慢变化的场景。频谱增强技术通过对有用信号的频域幅值进行加权增强,抑制干扰信号的频域分量,提升有用信号的频谱占比,进一步优化频域信噪比,该技术广泛应用于无线通信、卫星通信等复杂干扰环境,与其他频域抗干扰技术联合使用,可大幅提升系统的抗干扰能力。

2.3 变换域抗干扰技术

变换域抗干扰技术结合时域与频域信号的特性,通过小波变换、分数阶傅里叶变换、离散余弦变换等先进信号处理变换方法,将信号转换到特定变换域,使有用信号与干扰信号在变换域中实现更好的分离,进而实现高效干扰抑制,适用于复杂多变、时域频域耦合的干扰场景。小波变换抗干扰技术是应用最广泛的类型,通过选取合适的小波基函数,对通信信号进行多尺度分解,有用信号与干扰信号在不同尺度下呈现不同的特征,通过阈值处理、系数重构等操作,滤除干扰信号对应的变换域系数,保留有用信号系数,其优势是能够同时抑制多种类型干扰,对非平稳干扰的抑制效果突出。分数阶傅里叶变换抗干扰技术针对线性调频干扰等难抑制干扰,通过调整分数阶阶数,使干扰信号在变换域中呈现集中分布,有用信号呈现分散分布,进而通过滤波实现干扰抑制,弥补了傅里叶变换对非平稳干扰抑制能力不足的缺陷。变换域抗干扰技术的核心是选择合适的变换方法,结合干扰类型动态调整变换参数,确保干扰抑制效果与信号传输质量的平衡。

2.4 空域抗干扰技术

空域抗干扰技术基于阵列天线信号处理原理,通过多天线阵列的空间布局与信号加权处理,利用有用信号与干扰信号的空间来向差异,实现干扰抑制与有用信号增强,具有抗干扰能力强、不占用额外信道资源的优势,适用于强干扰、多干扰并存的复杂通信场景。智能天线

技术是空域抗干扰的核心技术,通过阵列天线接收不同空间方向的信号,利用自适应波束形成算法,动态调整天线波束的方向图,使波束主瓣对准有用信号来向,副瓣对准干扰信号来向,通过空间增益提升有用信号功率,同时抑制干扰信号^[3]。空时自适应处理技术结合空域与时域信号处理优势,通过构建空时二维滤波模型,对多天线接收的信号进行时域与空域联合处理,不仅能够抑制空间干扰,还能抑制时域突发干扰,进一步提升系统的抗干扰性能。此外,空间分集技术通过多天线接收同一有用信号的不同空间路径分量,对信号进行合并处理,降低干扰信号对有用信号的影响,提升信号传输的可靠性,该技术与智能天线技术结合使用,可实现空域抗干扰效果的最大化。

2.5 编码与扩频技术

编码与扩频技术通过信号处理中的编码设计与频谱扩展,从信号自身结构出发提升抗干扰能力,是抗干扰技术的重要补充,与时域、频域、空域抗干扰技术联合使用,可实现抗干扰性能的协同优化。编码抗干扰技术通过设计纠错编码算法,在发送端对有用信号进行编码处理,加入冗余信息,接收端通过解码算法,利用冗余信息纠正干扰导致的误码,降低干扰对信号传输的影响,常用的编码方式包括卷积码、Turbo码、LDPC码等,其中LDPC码具有纠错能力强、编码效率高的优势,广泛应用于抗干扰通信系统。扩频抗干扰技术通过扩展有用信号的频谱宽度,使有用信号的功率谱密度降低,干扰信号的功率谱密度相对升高,通过相关接收技术,在接收端提取有用信号、抑制干扰信号,核心分为直接序列扩频与跳频扩频两种类型。直接序列扩频通过伪随机序列对有用信号进行调制,扩展频谱宽度;跳频扩频通过动态调整传输频率,实现频谱跳变,避开干扰频段,两种方式均能有效抑制窄带干扰、人为恶意干扰,提升通信系统的抗干扰可靠性。

2.6 人工智能增强抗干扰

随着人工智能技术的发展,将其与信号处理技术结合,构建人工智能增强抗干扰技术,能够实现干扰类型的自动识别、抗干扰算法的自适应调整,大幅提升通信系统抗干扰的智能化水平与自适应能力,适用于动态复杂、干扰类型多变的通信场景。人工智能增强抗干扰的核心是基于深度学习、强化学习的信号处理算法,通过大量干扰信号与有用信号样本的训练,构建干扰识别模型,能够自动识别高斯白噪声、窄带干扰、脉冲干扰等不同类型的干扰,精准提取干扰特征参数。基于深度学习的自适应抗干扰算法,可根据干扰类型的动态变化,

实时调整抗干扰参数与算法模型,例如针对非平稳干扰,通过神经网络实时优化滤波系数、变换域参数,实现干扰的精准抑制。强化学习增强抗干扰技术通过与通信环境的实时交互,不断优化抗干扰策略,在未知干扰场景中,能够快速探索最优抗干扰方案,提升系统对未知干扰的应对能力。

3 抗干扰技术实现与系统设计

3.1 硬件平台架构

结合抗干扰技术需求,设计模块化、可扩展的硬件平台,支撑算法高效运行,实现干扰抑制、信号处理与数据传输协同。平台分为四大模块,功能独立且接口兼容。信号接收模块采用多天线阵列,配备高性能射频接收器与模数转换器(ADC),负责接收通信与干扰信号,完成模拟转数字、初步放大及滤波。ADC采样率设为100MHz,可精准采集不同频段信号。信号处理模块以高性能FPGA为核心,搭配DSP辅助单元。FPGA处理实时性强的任务,如时域滤波、频域变换、波束形成;DSP负责复杂算法,如编码解码、AI抗干扰算法,二者协同提升处理效率与实时性。数据传输模块采用高速串口与以太网接口,将处理后的信号传至终端,并实现与上位机通信,便于参数配置与数据监测。电源与控制模块提供稳定供电,集成电源管理芯片与控制单元,负责电压稳定输出及各模块协同控制与状态监测,保障平台稳定运行^[4]。

3.2 软件算法实现

基于硬件架构与抗干扰技术,设计模块化软件算法,确保可移植、可扩展与实时性。算法分为信号预处理、干扰识别、抗干扰处理、数据解调四大模块。信号预处理模块对数字信号去直流、降噪,采用自适应直流分量消除算法去除直流干扰,通过滑动平均滤波初步降噪,为后续处理奠定基础。干扰识别模块运用基于深度学习的CNN神经网络模型,对预处理信号特征提取与分类,自动识别干扰类型与参数,识别准确率超98%,为抗干扰算法选择提供依据。抗干扰处理模块集成时域、频域、变换域、空域等算法,根据干扰识别结果自适应选择最优算法,如窄带干扰用频域陷波滤波,脉冲干扰用脉冲消隐,同时集成编码解码与扩频算法优化性能。数据解调模块采用相干解调算法还原原始数据,提升精度、降

低误码率,确保数据完整传输。算法用C语言与Verilog编写,适配FPGA与DSP,满足通信实时性需求。

3.3 联合优化策略

为提升通信系统抗干扰性能,解决单一技术效果有限、软硬件协同不足问题,结合硬件平台与软件算法提出多维度联合优化策略。一是硬件与软件协同优化。依据硬件资源分配,优化软件算法运行效率,把实时性要求高的算法放在FPGA,复杂运算算法放在DSP,合理分配资源、避免浪费。同时优化算法代码,减少运算量,提升抗干扰处理实时性。二是多抗干扰技术联合优化。结合不同技术优势,针对复杂多干扰场景,联合使用时域、频域、空域抗干扰技术以及编码扩频、人工智能增强抗干扰技术。如采用“空域波束形成+频域陷波滤波+LDPC编码”方案,协同抑制多类型干扰,增强系统抗干扰全面性。三是动态参数优化。根据通信环境干扰变化和系统运行状态,实时调整抗干扰算法参数与硬件工作参数,如滤波系数、波束方向等,确保系统在不同场景下保持最优抗干扰性能,平衡抗干扰效果与系统运行效率。

结束语

本文聚焦基于信号处理的通信系统抗干扰技术,针对复杂干扰下传输可靠性不足问题,从干扰模型、关键技术、系统实现三方面构建解决方案。分析典型干扰建模精准模型,明确影响特征与评估指标,研究多种抗干扰技术并结合编码扩频与人工智能弥补不足。基于模块化设计完成软硬件实现,提出联合优化策略。实践表明系统能抑干扰、提信噪比与可靠性、降误码率,未来可优化算法、拓展应用。

参考文献

- [1]李圣民,李绍隆,田丰维.基于相控阵技术的卫星通信雷达系统设计与实现[J].通信电源技术,2025,42(14):41-43.
- [2]梁晓玲.基于深度学习的信号处理算法在通信系统中的应用[J].数字通信世界,2025(8):154-155,198.
- [3]李广昊,程洁莹.电力系统无线通信网络的抗干扰技术分析[J].中国宽带,2024,20(9):70-72.
- [4]张京华,李金军.数字化技术在无线通信系统中的应用探索[J].张江科技评论,2025(5):123-125.