

短波通信中自适应抗干扰技术的优化与实现

张琳琳

成都博纳神梭科技发展有限公司河北分公司 河北 石家庄 050081

摘要：本文聚焦于短波通信中的自适应抗干扰技术，深入剖析其发展现状与面临的挑战。通过对自适应抗干扰技术的原理和关键技术进行详细阐述，结合当前短波通信环境的特点，提出了一系列针对性的优化策略，并探讨了相应的实现方法。旨在提升短波通信在复杂干扰环境下的可靠性和稳定性，为短波通信系统的进一步发展提供理论支持和实践指导。

关键词：短波通信；自适应抗干扰技术；优化策略；实现方法

1 引言

短波通信作为一种重要的远程通信手段，具有通信距离远、设备简单、机动灵活等优点，在军事、航海、航空、应急通信等领域发挥着不可替代的作用。然而，短波信道存在多径传播、衰落、干扰等诸多不利因素，尤其是随着现代电子技术的飞速发展，各种有意和无意的干扰日益严重，极大地影响了短波通信的质量和可靠性。自适应抗干扰技术能够根据信道环境和干扰情况自动调整通信系统的参数，以实现对抗干扰的有效抑制和通信性能的优化，因此成为短波通信领域的研究热点。

2 短波通信及自适应抗干扰技术概述

2.1 短波通信的特点与挑战

短波指频率3—30MHz的电磁波，传播靠天波和地波。天波经电离层反射可远距离传播，覆盖数千至上万公里；地波沿地球表面传播，一般在一百公里以内。短波通信有优点也有挑战。多径传播是短波信道突出特点，电离层不均匀性和时变性使信号经多路径到达接收端，致信号衰落、畸变，严重时通信中断。短波频段开放，易受有意（如敌方电子干扰）和无意（其他短波设备等电磁辐射）干扰，降低信噪比，影响通信质量甚至致通信中断。

2.2 自适应抗干扰技术的原理与分类

自适应抗干扰技术能根据信道和干扰情况自动调整系统参数，抑制干扰、优化通信性能。其核心是实时监测信道和干扰特征，用自适应算法动态调整系统参数。该技术分多种类型，如时域、频域、空域自适应抗干扰技术。时域技术对接收信号在时域处理，如自适应滤波、均衡，抑制干扰和码间干扰；频域技术将信号转至频域，分析处理频谱，避开或抑制干扰频段；空域技术利用天线阵列空域滤波特性，调整权值形成特定波束方向图，抑制特定方向干扰。

3 短波通信中自适应抗干扰技术的发展现状

短波通信自适应抗干扰技术有进展，但问题待解。其一，自适应算法收敛速度和稳态性能需提升。信道和干扰不断变化，算法需快速准确跟踪调整，但现有算法存在收敛慢、稳态误差大等问题，影响动态环境下系统性能^[1]。其二，多技术融合难度大。该技术涉及多学科，实现融合要解决接口标准、协同工作机制等技术难题，目前研究尚处起步阶段，未形成成熟体系和方案。其三，设备复杂度和成本高。实现自适应抗干扰功能需复杂软硬件系统，增加设备复杂度、成本，对可靠性和可维护性要求更高，在成本敏感场景难以广泛应用。

4 短波通信中自适应抗干扰技术的优化策略

4.1 自适应算法的优化

4.1.1 改进的LMS算法

最小均方（LMS）算法是一种常用的自适应滤波算法，具有计算复杂度低、易于实现等优点。然而，传统的LMS算法存在收敛速度慢、对初始值敏感等问题。

变步长LMS算法：为了克服传统LMS算法的缺点，可以采用变步长LMS算法。该算法根据误差信号的大小自动调整步长因子。当误差较大时，采用较大的步长以加快收敛速度；当误差较小时，采用较小的步长以提高稳态性能。例如，Sigmoid变步长LMS算法，其步长更新公式为：

其中， $\mu(n)$ 是第 n 次迭代的步长， β 和 α 是控制步长变化的参数， $e(n)$ 是第 n 次迭代的误差信号。

归一化LMS算法：结合归一化技术，对输入信号进行归一化处理，可以进一步提高算法的性能。归一化LMS算法的权重更新公式为：

其中， $w(n)$ 是第 n 次迭代的权重向量， μ 是固定步长， ϵ 是一个很小的正数，用于防止分母为零， $x(n)$ 是第 n 次迭代的输入信号向量， $e(n)$ 是第 n 次迭代的误差信号。

4.1.2 RLS算法的优化

为了降低RLS算法的计算复杂度,可以采用快速RLS算法,如快速横向滤波器(FTF)算法。FTF算法通过巧妙的矩阵运算,将RLS算法的计算复杂度从 $O(N^2)$ 降低到 $O(N)$,其中 N 为滤波器的阶数。FTF算法的核心思想是将滤波器的状态向量和增益向量的更新过程进行分解和优化,减少了矩阵乘法的运算量。RLS算法中的遗忘因子用于控制算法对历史数据的遗忘程度^[2]。对遗忘因子进行优化,根据信道环境的变化动态调整遗忘因子的值,可以提高算法的适应性和稳态性能。例如,当信道环境变化较快时,采用较小的遗忘因子,使算法更快地跟踪信道的变化;当信道环境相对稳定时,采用较大的遗忘因子,提高算法的稳态性能。

4.2 多技术融合策略

4.2.1 时频域联合抗干扰

时频域联合抗干扰技术首先对接收信号进行时频分析,如短时傅里叶变换(STFT)、小波变换等,获取信号在时频域的特征信息。STFT通过在时域上对信号进行加窗处理,然后对每个窗内的信号进行傅里叶变换,得到信号的时频分布。小波变换则具有多分辨率分析的特点,能够更好地捕捉信号的瞬态特征。根据时频域的特征信息,采用自适应算法对信号进行处理。例如,在时频域进行滤波,将干扰频段的能量置零或进行衰减处理;或者采用自适应波束形成技术,在时频域对信号的到达方向进行估计,然后调整天线阵列的权值,抑制来自干扰方向的信号。

4.2.2 空时自适应处理(STAP)技术

空时自适应处理技术是将空域和时域处理相结合的一种先进抗干扰技术。它利用天线阵列的空域滤波特性和自适应算法的时域处理能力,通过对天线阵列的权值进行联合优化,形成特定的空时波束方向图,从而抑制来自不同方向 and 不同时间的干扰。STAP技术需要处理高维的协方差矩阵,计算复杂度较高。为了降低STAP技术的计算复杂度,可以采用降维处理技术。例如,部分自适应STAP技术只对协方差矩阵的一部分进行自适应处理,减少了需要估计的参数数量。常见的降维方法有主分量分析(PCA)、互谱度量(CSM)等。

4.3 智能算法的应用

4.3.1 遗传算法在自适应抗干扰中的应用

遗传算法是一种模拟生物进化过程的智能优化算法,具有全局搜索能力强、适用于复杂优化问题等优点。在短波通信自适应抗干扰中,遗传算法可以用于优化自适应滤波器的参数、天线阵列的权值等。例如,将

自适应滤波器的系数作为遗传算法的个体,通过选择、交叉、变异等操作,搜索最优的滤波器系数。选择操作根据个体的适应度函数值选择优秀的个体进入下一代;交叉操作将两个个体的部分基因进行交换,产生新的个体;变异操作以一定的概率改变个体的某个基因值,增加种群的多样性^[3]。适应度函数是遗传算法的关键,它用于评价个体的优劣。在自适应抗干扰中,适应度函数可以根据通信系统的性能指标来设计,如误码率、信噪比等。例如,将误码率的倒数作为适应度函数,误码率越低,适应度值越高。

4.3.2 神经网络在自适应抗干扰中的应用

在短波通信自适应抗干扰中,神经网络可以用于干扰识别。通过收集不同类型干扰的信号特征,构建神经网络模型进行训练。训练好的神经网络可以根据输入信号的特征,准确识别干扰的类型,如噪声干扰、欺骗干扰等。神经网络还可以用于自适应均衡,通过学习信道的特性,自动调整均衡器的参数,以消除码间干扰。例如,采用前馈神经网络作为均衡器,网络的输入是接收信号的样本,输出是均衡后的信号。通过反向传播算法对网络的权重进行调整,使得均衡后的信号与期望信号之间的误差最小。

5 短波通信中自适应抗干扰技术的实现方法

5.1 硬件平台设计

5.1.1 射频前端设计

滤波器设计:在射频前端设计中,应采用高性能的滤波器,以提高信号的选择性。例如,采用声表面波(SAW)滤波器,它具有体积小、重量轻、插入损耗低等优点,能够有效地抑制带外干扰。同时,可以根据不同的通信频段和干扰情况,设计不同带宽和中心频率的滤波器。

低噪声放大器设计:低噪声放大器(LNA)用于放大接收到的微弱信号,同时尽量降低自身的噪声系数。采用低温共烧陶瓷(LTCC)技术可以制作高性能的LNA,该技术具有集成度高、性能稳定等优点。此外,还可以采用自适应增益控制技术,根据输入信号的强度自动调整LNA的增益,防止信号过载或失真。

自适应射频前端技术:采用自适应射频前端技术,根据干扰情况自动调整滤波器的带宽和中心频率,实现对干扰的有效抑制。例如,通过实时监测频谱中的干扰分布,利用微控制器控制滤波器的可调元件,改变滤波器的参数,使其避开干扰频段。

5.1.2 天线阵列设计

天线类型选择:在设计天线阵列时,应根据短波通

信的特点和抗干扰需求,选择合适的天线类型。例如,可以采用偶极子天线、八木天线等常见的天线类型。偶极子天线结构简单,方向图呈“8”字形,适合用于短波通信的接收和发射;八木天线具有较高的增益和方向性,能够有效地提高信号的接收强度。

阵列布局设计:常见的阵列形式有均匀线性阵列、圆形阵列等。均匀线性阵列结构简单,易于分析和设计,但方向图的旁瓣电平较高;圆形阵列具有全向性的特点,能够在360度范围内进行波束扫描^[4]。可以根据具体的应用场景和抗干扰要求,选择合适的阵列布局。

智能天线技术:采用智能天线技术,通过实时调整天线阵列的权值,实现对干扰方向的零陷和对期望信号方向的增益。智能天线系统通常包括天线阵列、射频前端、信号处理单元等部分。信号处理单元根据接收到的信号和干扰信息,计算出最优的天线权值,并通过射频前端调整各天线阵元的相位和幅度。

5.1.3 数字信号处理平台设计

处理芯片选择:应选择高性能的数字信号处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)作为处理芯片,以满足实时信号处理的要求。DSP具有强大的数字信号处理能力,适合运行复杂的自适应算法;FPGA具有高度的灵活性和并行处理能力,能够实现高速的信号处理。例如,TI公司的TMS320C6000系列DSP和Xilinx公司的Virtex系列FPGA都是常用的处理芯片。

功能模块划分:在平台设计中,应合理划分功能模块,如自适应滤波模块、干扰识别模块、波束形成模块等。每个模块负责特定的功能,通过总线或接口进行数据交换。例如,自适应滤波模块负责对接收信号进行滤波处理,去除干扰信号;干扰识别模块通过分析信号的特征,识别干扰的类型;波束形成模块根据干扰和期望信号的方向,调整天线阵列的权值。

5.2 软件系统设计

5.2.1 操作系统选择与定制

实时操作系统应用:短波通信自适应抗干扰系统实时性要求高,选合适实时操作系统很关键。如VxWorks,应用广泛,可靠性高、实时性强、可裁剪性好,能确保自适应抗干扰算法按时计算响应,满足实时信号处理需求。可对任务优先级调度,将自适应算法相关任务设为高

优先级,保证其优先获CPU资源及时处理信号和干扰。

定制化开发:依系统具体需求对操作系统定制开发。去除不必要模块和功能,减少资源占用和启动时间,如不需图形界面功能,可裁剪相关图形驱动和库文件。同时,针对算法特点开发特定设备驱动程序和系统服务,支持算法运行与硬件交互。

5.2.2 自适应抗干扰算法软件实现

算法模块封装:将自适应抗干扰算法封装成独立软件模块,有明确输入输出接口。如自适应滤波算法模块,输入接收信号和期望信号(若有),输出滤波后信号。模块内实现算法计算,通过接口与其他模块数据交互,提高代码可维护性和可扩展性,方便算法升级修改。

算法调度与管理:设计算法调度与管理模块,根据信道环境和干扰情况动态选择调用合适算法。该模块实时监测信噪比、干扰类型等参数,按预设规则决定算法。如遇强窄带干扰,优先调用频域自适应抗干扰算法;存在码间干扰,启动自适应均衡算法。同时,该模块负责动态调整算法参数,优化算法性能。

结语

本文深入研究了短波通信中的自适应抗干扰技术,针对现有问题提出优化策略与实现方法,通过改进自适应算法、融合多种抗干扰技术及应用智能算法等,提升了其性能。尽管取得一定成果,但仍有诸多问题待解。未来研究将聚焦于开发更高效的自适应算法,提升收敛速度与稳态性能;加强多技术融合研究,探索有效协同机制;开展大规模天线阵列和毫米波短波通信技术研究;结合人工智能和大数据,推动自适应抗干扰技术智能化、自主化发展。

参考文献

- [1]贺世民,袁宗圃,何旭.短波通信中的抗干扰技术研究[J].中国战略新兴产业,2025,(12):54-56.
- [2]解承宇,周志强.短波通信抗干扰技术的应用及其未来发展趋势[J].华东科技,2025,(04):138-140.
- [3]戴仁村.信息化条件下短波通信抗干扰技术与应用分析[J].家庭影院技术,2023,(18):49-52.
- [4]方仁杰.短波通信中抗干扰技术及应用分析[J].中国新通信,2023,25(03):13-15.