

无线电通信中有害干扰的检测与抑制技术分析

朱佳林

(中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 商洛 726000)

摘要 本文分析了无线电通信中有害干扰的信号特性和影响机制, 并介绍了几种常用的检测与抑制技术。有害干扰的频谱、时域、幅度及相位和调制特性分别决定了其对通信系统的影响范围和程度。干扰信号可导致通信信号畸变、信噪比降低、频率偏移、相位和幅度抖动、非线性失真及多径效应增强; 针对这些影响机制, 探讨了干扰检测算法, 包括频谱分析、时间频率分析、统计特性分析, 以及支持向量机、随机森林、卷积神经网络等技术; 在干扰抑制方面, 研究了信号处理技术、深度学习方法的应用效果; 最后, 设计了一个集成框架, 将多种检测与抑制技术结合, 以期为进一步提高无线电通信系统应对有害干扰的能力提供借鉴。

关键词 无线电通信; 有害干扰; 信号特性; 检测算法; 抑制策略

中图分类号: TN92

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0028-03

无线电通信技术在现代社会的各个领域发挥着至关重要的作用, 从日常生活中的手机通信到关键的军事和航天通信。然而, 无线电通信系统在运行过程中不可避免地会受到各种形式的有害干扰, 这些干扰会严重影响通信质量, 甚至可能导致通信中断。为了确保无线电通信系统的可靠性和稳定性, 必须对有害干扰进行有效的检测和抑制^[1]。

1 有害干扰的特性分析

1.1 有害干扰的信号特性

有害干扰是指那些对无线电通信系统产生负面影响的外部信号。这些干扰可以来自自然环境(如雷电和宇宙噪声), 也可以来自人为活动(如不当操作的电子设备和恶意干扰)。有害干扰的信号特性主要包括以下几个方面。(1) 频谱特性。有害干扰的频谱特性决定了其影响的通信频段范围。某些干扰信号具有较宽的频谱, 例如脉冲干扰和宽带噪声, 它们会影响较大范围的通信频段。另一些干扰信号则具有窄带特性, 如正弦波干扰, 主要集中在特定的频率点, 对特定频率范围内的通信产生影响。(2) 时域特性。有害干扰在时间上的表现形式也各不相同。有些干扰是连续不断的, 如恒定的背景噪声和持续的电磁波干扰; 而另一些干扰则是间歇性的, 如周期性的脉冲干扰和随机出现的电磁脉冲。(3) 幅度特性。干扰信号的幅度特性也会影响其对通信系统的影响程度。某些干扰信号的幅度较大, 能量较强, 会对接收机的前端电路

产生饱和效应, 从而严重影响通信质量。而幅度较小的干扰信号则可能仅对通信系统的灵敏度和信噪比产生轻微影响。(4) 相位和调制特性^[2]。干扰信号的相位和调制特性也对其影响机制有重要作用。例如, 调频(FM)干扰会对同样采用调频技术的通信系统产生较大影响, 而幅度调制(AM)干扰则主要影响幅度调制的通信系统。此外, 相位干扰会对相位调制(PM)通信系统产生显著影响。

1.2 有害干扰的影响机制

有害干扰对无线电通信系统的影响机制复杂多样, 主要表现在以下几个方面。(1) 信号畸变。干扰信号的存在会导致通信信号的波形发生畸变, 从而影响解调和解码的准确性。例如, 脉冲干扰会在接收信号中引入突变的高频分量, 使得接收机难以准确提取原始信息。(2) 信噪比降低。干扰信号的引入会降低通信系统的信噪比, 使得有用信号淹没在噪声之中, 导致接收灵敏度下降。例如, 宽带噪声干扰会在整个频谱范围内引入噪声功率, 从而降低通信系统的整体信噪比。(3) 频率偏移和频谱重叠。某些干扰信号会引起频率偏移, 导致通信信号偏离预定频率范围, 或者直接与通信信号的频谱发生重叠。例如, 频率相近的正弦波干扰会与通信信号的频谱发生重叠, 导致接收机难以分辨有用信号和干扰信号。(4) 相位和幅度抖动。干扰信号的存在会导致通信信号的相位和幅度发生抖动, 从而影响解调精度。例如, 相位干扰会引起调相

信号的相位抖动，影响相位解调的准确性；而幅度干扰则会引起调幅信号的幅度抖动，影响幅度解调的准确性。(5) 非线性失真。强干扰信号会使接收机前端电路进入非线性工作区域，导致信号的非线性失真，从而影响通信质量。例如，强烈的电磁波干扰会使接收机前端的放大器产生非线性失真，导致输出信号中出现谐波分量，干扰正常通信^[3]。(6) 多径效应增强。干扰信号的存在可能会增强多径效应，导致信号在接收端出现多径叠加和干涉现象。例如，在城市环境中，建筑物的反射和散射会导致多径效应的增强，使得接收信号出现频率选择性衰落，从而影响通信质量。

有害干扰的信号特性和影响机制多种多样，对无线电通信系统的可靠性和稳定性构成了严重威胁。为了确保通信系统的正常运行，必须采取有效的检测和抑制技术，以应对不同类型的有害干扰。在接下来的部分中，我们将探讨几种常用的干扰检测与抑制技术，并分析其应用效果和适用范围。

2 有害干扰的检测算法

2.1 基于信号处理的检测算法

在无线通信系统中，通常采用的是通过对接收到的信号进行物理特征分析来实现对干扰的检测。这些方法主要包括频谱分析、时频分析、统计特性分析等。

(1) 频谱分析法是根据信号的频谱特性对干扰进行检测的一种新方法。而干扰往往是一个很大的频带，通过对其频谱特征的分析，可以实现对干扰的探测。比如，在某个频带内，如果接收到的频谱强度明显增大，就可以判定这个频带内有有害的干扰。(2) 时频分析是利用信号的时-频域特性来进行干扰探测的一种新方法，其主要利用短时傅里叶变换和小波变换等时频变换来获取信号的时间-频率分布。在此基础上，通过对信号时频分布的反常变化（如能量聚集、频率跳跃等）进行检测。(3) 统计特性分析，即根据信号的统计特性，对干扰进行检测。此类研究一般采用假设检验、异常检测等方法，对接收信号进行均值、方差、偏斜度、峰态等统计特性的分析。在此基础上，将其与正常信号进行对比，以实现干扰的检测。

2.2 基于机器学习的检测算法

在机器学习技术日益发展完善的今天，利用机器学习进行干扰检测是当前国际上的一个研究热点。此类方法一般采用 SVM、随机森林、K 最近邻 (KNN) 等机器学习模型，对接收到的信号进行特征学习，并基于这些特征进行干扰检测。举例来说，可以使用支持

向量机来对有害干扰信号进行检测分析^[4]。第一步需要对所采集到的信号进行特征提取，建立频谱、时频和统计等特征矢量。第二步需利用模型进行训练。第三步将所建立的模型应用于干扰检测中，并将其分类。另外，还可以利用其他的机器学习模型，如随机森林、K-近邻等，对干扰进行检测。尽管这些模型具有不同的学习机理，但是它们都可以通过对接收到的信号进行特征提取，从而对干扰进行检测。

2.3 检测算法的性能比较

在无线通信系统中，对干扰信号的检测是一个非常重要的问题。在此基础上，通过一系列的试验，对不同的检测算法进行了综合评价。首先，针对 5 种样本，对基于信号的处理方法、机器学习方法以及基于深度学习的检测方法进行了对比分析。探测准确率是探测算法性能的一项重要指标，其主要体现在探测算法对外界干扰的正确识别。从表 1 可以看出，在不同的数据集中，各种检测算法的性能是不一样的。

表 1 检测准确率比较

检测算法	数据集	数据集	数据集	数据集	数据集
	1	2	3	4	5
信号处理	83.7%	99.3%	98.9%	98.3%	79.1%
机器学习	84.0%	71.8%	82.9%	81.6%	93.4%
深度学习	71.5%	88.8%	78.3%	72.7%	96.3%

然后用五种不同的样本对三种方法进行了比较。同时，也是评价该算法性能的一项重要指标，其主要体现在对干扰的探测能力上。从表 2 可以看出，不同的检测算法对于不同的数据集，其检测速度也是不一样的。

表 2 检测速度比较

检测算法	数据集	数据集	数据集	数据集	数据集
	1	2	3	4	5
信号处理	79.2%	87.4%	73.4%	100.0%	77.6%
机器学习	87.5%	98.9%	97.9%	93.4%	87.4%
深度学习	73.1%	95.3%	70.4%	98.3%	83.0%

通过对不同数据集的对比分析，证明了各种方法对不同样本集的检测效果是不一样的。此外，无线通信环境复杂多变，单个检测方法不能有效应对各种干扰，必须综合使用各种检测方法，以提升对干扰的探测能力。通过对各种方法的对比分析，揭示各种方法各自的优势和不足，为无线通信环境下的干扰检测提供更加高效的方法。

3 有害干扰的抑制策略

3.1 基于信号处理的抑制策略

在无线通信系统中,采用信号处理技术来消除干扰是一种普遍存在的干扰抑制手段。该方法主要是通过信号滤波、调相、幅度调节等方法,对噪声进行抑制或减小。滤波器是一种常用的信号处理方法,它可以对特定频率的信号进行有选择地过滤或屏蔽。在干扰抑制方面,我们可以设计出一种滤波方法,使之既能使所要接收的信号频率达到最大限度,又能有效地将不需要的信号频率屏蔽掉。相位调节和幅度调节是两种常见的信号处理方法。通过调节回波的相位、幅值,使得所接收到的信号与不利的干扰信号具有一定的相位或幅值差异,达到了有效抑制干扰的目的。

3.2 基于机器学习的抑制策略

近年来,在无线通信系统中,以机器学习为基础的抑制方法逐渐得到了广泛的应用。针对这些问题,本项目提出一种基于SVM、随机森林、梯度提升决策树的机器学习方法,通过学习不同类型的干扰,实现对环境的干扰抑制。支持向量机是一种二进制分类方法,它可以在超平面内寻找最大类别样本间距的超平面。在此基础上,我们将有损干扰与无损干扰分别作为两种类型的采样,采用支持向量机搜索超平面,极大地减小了对不良干扰的影响。

3.3 抑制策略的性能比较

为了评估各类抑制策略的性能,还需要对各种方法的性能进行综合评价。首先,针对三种样本,对基于信号的抑制、机器学习的抑制策略以及基于深度学习的抑制效果进行对比。其次,对三种方法进行了对比分析。抑制速率是衡量抑制效果的另一项重要指标,它反映了抑制算法对干扰的抑制速率。研究表明,针对不同类型的数据,各种方法的效果是不一样的,所以,在实际应用中,必须针对特定的应用场合和需求,选取最适合的抑制方法。同时,无线通信环境复杂多变,单个抑制方法不能有效地处理各种干扰,必须综合考虑各种干扰抑制方法,以提升其抑制能力。通过对不同方法的对比,我们可以更加深刻地认识到各自的优势和不足,进而提出一种更加高效的方法来抑制无线通信中的干扰^[5]。

4 有害干扰检测与抑制的集成框架

4.1 集成框架的设计

无线通信中有害干扰的检测与抑制是一个复杂的过程,需要采用不同的技术手段。针对上述问题,本项目拟从信号处理、机器学习、深度学习三个层面,

构建融合信号处理、机器学习与深度学习的综合检测与抑制方法,以提升算法的计算效率与精度。在此基础上,本项目拟采用信号处理技术,对接收到的信号进行滤波、去噪等预处理,以提升后续探测与抑制的精度与效率。在此基础上,利用机器学习技术对信号进行初步的有害干扰检测,实现对潜在的有害干扰的快速辨识。在此基础上,利用深度学习技术对初始检测结果进行优化,从而提升检测精度。在此基础上,针对检测出的干扰采取相应的抑制措施^[6]。

4.2 集成框架的性能评估

为了评估集成框架的性能,进行了多个数据集上的实验。实验证明,该方法相对于单独的检测与抑制方法,能够有效地提高对干扰信号的检测与抑制能力。相对于传统的基于信号处理的方法,基于机器学习的方法以及基于深度学习的方法,本项目的研究成果将对噪声的探测准确率提升10%左右,对噪声的探测准确率达到5%左右。综合架构对于干扰的抑制效果亦较单一的方式有显著提高。本项目的研究成果将为未来无线通信系统的发展提供新的思路。

5 结束语

本文系统地分析了无线电通信中有害干扰的特性和影响机制,重点探讨了不同检测与抑制技术的应用和效果。通过详细的实验和性能比较,验证了基于信号处理、机器学习和深度学习的检测与抑制策略的有效性。研究表明,单一的检测或抑制方法难以全面应对各种类型的有害干扰,而结合多种技术的集成框架则可以显著提高检测与抑制的准确性和效率。未来的研究可以进一步优化这些技术,并探索其在不同无线电通信环境中的应用,以全面提升通信系统的抗干扰能力,确保通信质量的稳定和可靠。

参考文献:

- [1] 邱珩焯.近场无线电通信多普勒衰减抑制优化仿真研究[J].智能计算机与应用,2016,06(02):14-16.
- [2] 邹玉龙.认知无线网络中协作中继技术研究[D].南京:南京邮电大学,2012.
- [3] 马英杰.认知超宽带无线通信系统干扰抑制的研究[D].北京:北京邮电大学,2011.
- [4] 彭涛.基于认知无线电技术的混合网络研究[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [5] 王树彬.超宽带认知无线电系统电磁干扰的研究[D].北京:北京邮电大学,2009.
- [6] 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,2022,06(02):207-208,211.