

智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用研究

王平

国能朔黄铁路发展有限责任公司, 北京 100080

DOI:10.61369/ERA.2026020012

摘要 : 铁路通信网络作为铁路运输调度、行车控制及安全保障的核心支撑, 其运行稳定性直接关乎铁路运输系统的高效与安全。干扰问题是长期制约铁路通信网络质量提升的关键瓶颈, 传统干扰抑制手段因适应性差、响应滞后等缺陷, 难以满足复杂多变的铁路通信场景需求。研究表明, 智能化技术可通过精准识别干扰、动态调整抑制策略, 显著提升铁路通信网络的抗干扰能力, 为铁路通信系统的高质量运行提供有力支撑。

关键词 : 智能化技术; 铁路通信网络; 干扰抑制; 机器学习; 自适应滤波

Application of Intelligent Technology in Railway Communication Network Interference Suppression

Wang Ping

CHN ENERGY Shuohuang Railway Development Co., LTD. Beijing 100080

Abstract : As the core infrastructure for railway transportation scheduling, train control, and safety assurance, the operational stability of railway communication networks directly impacts the efficiency and safety of the entire railway system. Interference has long been a critical bottleneck hindering the quality improvement of railway communication networks. Traditional interference suppression methods, plagued by poor adaptability and delayed responses, struggle to meet the demands of complex and dynamic railway communication scenarios. Research indicates that intelligent technologies can significantly enhance the anti-interference capabilities of railway communication networks by accurately identifying interference and dynamically adjusting suppression strategies, thereby providing robust support for high-quality operations in railway communication systems.

Keywords : intelligent technology; railway communication network; interference suppression; machine learning; adaptive filtering

引言

铁路通信网络是保障列车运行调度、行车安全监控、旅客服务等核心业务开展的关键基础设施, 其通信质量直接决定铁路运输系统的可靠性与效率。随着高速铁路、重载铁路、智能铁路的快速发展, 铁路通信网络的传输速率、接入设备数量及业务复杂度大幅提升, 与此同时, 干扰问题也日益凸显。本文以智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用为研究核心, 首先剖析铁路通信网络干扰的主要类型及成因, 明确干扰抑制的核心诉求; 随后深入探讨机器学习、深度学习、智能认知无线电及智能自适应滤波等关键智能化技术的应用机理, 结合具体应用场景阐述技术落地路径; 最后分析智能化干扰抑制系统的构建要点及应用成效^[1]。铁路通信场景中, 干扰源不仅包括外部的民用通信信号、工业电磁辐射, 还涵盖内部的列车牵引系统、信号控制系统等设备产生的电磁干扰, 这些干扰会导致通信信号衰减、误码率升高, 严重时甚至引发通信中断, 威胁铁路运输安全。传统干扰抑制方法如固定滤波、频率规避等, 多基于预设场景设计, 难以适应干扰源类型多变、强度动态波动的复杂环境, 在干扰识别精度和抑制实时性上存在明显不足。近年来, 人工智能、大数据等智能化技术的突破为铁路通信网络干扰抑制提供了新的解决思路, 其具备的自适应学习、动态决策能力可实现对干扰的精准感知与高效抑制。因此, 深入研究智能化技术在铁路通信网络干扰抑制中的应用, 破解传统方法瓶颈, 对于提升铁路通信网络稳定性、保障铁路运输安全具有重要的理论与实践意义^[2]。

一、铁路通信网络干扰类型及成因分析

（一）内部干扰及成因

内部干扰是指铁路系统自身设备运行过程中产生的电磁辐射或信号泄漏对通信网络造成的干扰，是铁路通信网络最主要的干扰来源之一，具有干扰源位置固定、干扰强度与设备运行状态强相关的特点。其主要成因包括以下两方面：一是列车牵引系统产生的干扰，列车牵引变流器在工作过程中会产生大量谐波电流，这些谐波通过牵引网传导并对外辐射电磁能量，其频率范围覆盖铁路通信常用的450MHz、800MHz等频段，极易对列车与地面之间的无线通信造成干扰；二是信号控制系统与通信系统的频率耦合干扰，铁路信号控制系统中的轨道电路、列控设备等运行时会产生特定频率的信号，当这些信号频率与通信系统频段接近时，会通过电磁耦合进入通信链路，导致通信信号信噪比下降。

（二）外部干扰及成因

外部干扰是指铁路系统之外的电磁环境或设备产生的干扰，其具有干扰源分布分散、类型多变、强度波动大的特点，给干扰抑制带来较大难度。主要成因包括：一是民用通信系统的同频或邻频干扰，随着5G、4G等民用通信网络的广泛覆盖，其基站信号可能与铁路通信网络（如GSM-R、LTE-R、5G-R）使用的频段产生重叠或邻频干扰，尤其是在铁路沿线城镇区域，民用基站密度较高，干扰问题更为突出；二是工业电磁干扰，铁路沿线的工厂、变电站等工业设施运行时会产生强电磁辐射，如变电站的高压设备会产生宽频段的电磁噪声，工业电机的启停会产生脉冲干扰，这些干扰会通过空间传播进入铁路通信接收设备；三是自然干扰，如雷电活动产生的电磁脉冲、大气噪声等，虽然此类干扰具有随机性，但强度较大时会对通信链路造成短暂中断^[4]。

（三）传输链路干扰及成因

传输链路干扰是指信号在传输过程中因链路损耗、环境变化等因素产生的干扰，主要影响通信信号的传输质量。其成因主要包括：一是多径干扰，在铁路场景中，通信信号会经过列车车体、轨道、沿线建筑物等物体的反射、散射，形成多径信号，多径信号之间的叠加会导致接收信号幅度和相位失真，即多径衰落；二是链路衰减与噪声累积，铁路通信链路涵盖无线传输和有线传输部分，无线传输受距离、地形影响会产生路径损耗，有线传输受线缆损耗、接头损耗影响会导致信号衰减，同时传输链路中的电子设备会产生热噪声，衰减的信号与噪声叠加后会降低通信质量；三是切换干扰，在列车高速运行过程中，通信终端需要在不同基站或接入点之间进行切换，切换过程中可能出现信号中断、重叠区域干扰等问题，影响通信连续性^[5]。

二、智能化技术在干扰抑制中的核心应用机理

（一）机器学习技术在干扰识别中的应用机理

干扰识别是干扰抑制的前提，机器学习技术通过对通信信号特征的提取与学习，实现对干扰类型、强度及来源的精准判断，其核心流程包括特征工程、模型训练与推理预测三个阶段。在特

征工程阶段，先采集铁路通信网络中的接收信号数据，包括正常通信信号、各种已知干扰信号数据，然后获取信号的时域特征，如峰值、均值、方差、脉冲宽度；频域特征，如频谱峰值、中心频率、带宽、谐波分量；变换域特征，如小波变换后的低频系数、高频系数，这些特征可以有效区分不同类型的干扰。例如，牵引系统产生的谐波干扰在频域上为特定频率的峰值，而民用通信的同频干扰在频域上表现为与通信信号频段重叠的连续谱。在模型训练阶段，将提取的特征数据划分为训练集和测试集，使用适当的机器学习算法构建模型并训练^[6]。针对铁路通信干扰识别场景，常用的算法有SVM，决策树，随机森林及朴素贝叶斯等。其中，支持向量机通过寻找最优分类超平面，实现对干扰类型的分类，适合小样本数据场景；随机森林通过集成多棵决策树，能够有效降低过拟合风险，提高对复杂干扰特征的识别精度。在训练过程中，通过调整模型参数如SVM的核函数参数，随机森林的树数目优化模型性能，保证模型在测试集上的识别准确率达到预设要求。推理预测阶段，将实时采集的通信信号特征输入训练好的模型中，模型输出干扰类型、强度等识别结果，为后续抑制策略的制定提供依据。与传统的基于阈值的识别方法相比，机器学习技术能够适应干扰特征的动态变化，即使出现未知干扰，也可以通过增量学习的方式更新模型，提升识别能力^[7]。

（二）深度学习技术在干扰预测与动态抑制中的应用机理

铁路通信网络中的干扰强度、出现时间具有一定的规律性，如列车牵引系统干扰与列车运行速度、负载相关，民用通信干扰与时段（如上下班高峰）相关。深度学习技术凭借其强大的特征自动提取和时序预测能力，可实现对干扰的精准预测，并基于预测结果动态调整抑制策略。在干扰预测方面，常用的深度学习模型包括循环神经网络（RNN）、长短期记忆网络（LSTM）及门控循环单元（GRU）等，这些模型能够捕捉干扰信号的时序依赖性。具体应用中，首先采集历史干扰数据及相关影响因素数据（如列车运行数据、民用通信基站负载数据、时段数据等），将其构建为时序数据集；然后构建LSTM模型，模型通过输入门、遗忘门和输出门的协同作用，有效处理长序列数据中的依赖关系，避免传统RNN的梯度消失问题；通过历史数据训练模型后，输入当前时段的相关数据，模型可预测未来一段时间内干扰的类型、强度及出现概率。在动态抑制方面，结合预测结果，采用深度学习驱动的自适应抑制策略，例如，若预测到某时段牵引系统干扰强度将增大，可通过深度学习模型优化自适应滤波器的参数，提前增强对该频段干扰的抑制能力；对于预测到的同频干扰，可动态调整通信信道或功率分配方案，规避干扰影响^[8]。

（三）智能认知无线电技术在频谱自适应中的应用机理

频谱资源紧张及同频、邻频干扰是铁路通信网络的主要问题之一，智能认知无线电技术通过“感知-决策-调整”的闭环机制，实现对频谱资源的动态感知与自适应分配，从源头规避干扰。其核心机理包括频谱感知、频谱决策与频谱切换三个环节。频谱感知环节采用智能化感知算法（如基于深度学习的频谱感知算法）实时检测铁路通信频段及周边频段的频谱占用情况，识别空闲频谱和受干扰频谱。与传统的能量检测、循环平稳检测方法

相比,深度学习感知算法能够在低信噪比环境下精准区分噪声和弱干扰信号,提高频谱感知的准确性。频谱决策环节基于频谱感知结果、通信业务需求(如实时调度业务对时延、可靠性的要求)及干扰情况,通过强化学习等智能算法制定最优的频谱分配策略。强化学习将频谱分配过程建模为马尔可夫决策过程,智能体(认知无线电节点)通过与频谱环境的交互,不断学习不同频谱选择动作对应的奖励(如通信质量提升、干扰降低),最终形成最优的频谱选择策略。例如,当铁路通信当前使用的频段受到民用基站干扰时,频谱决策模块会选择相邻的空闲频段,并计算最优的传输功率,确保通信质量的同时避免对其他频段造成干扰。频谱切换环节在决策结果的指导下,实现通信终端与基站之间的平滑频谱切换,通过预测切换时机和优化切换流程,降低切换过程中的干扰和通信中断风险^[9]。

三、智能化干扰抑制系统的构建与应用实践

(一) 智能化干扰抑制系统的整体架构

智能化干扰抑制系统采用“分层架构+闭环控制”的设计思路,从上至下分为感知层、智能处理层、执行层及应用层四个层次。感知层是系统的数据来源,由分布在铁路沿线的基站、列车通信终端、轨道旁传感器及频谱监测设备组成,负责实时采集通信信号数据、频谱数据、列车运行数据及环境数据(如温度、湿度、地形),并通过数据传输链路将采集到的数据上传至智能处理层。感知层的关键在于数据采集的全面性和实时性,通过多设备协同采集实现对干扰信号的全方位监测。智能处理层是系统的核心,集成数据预处理模块、干扰识别模块、干扰预测模块及策略决策模块。数据预处理模块对感知层上传的数据进行去噪、归一化、数据融合等处理,提升数据质量;干扰识别模块采用机器学习模型对预处理后的数据进行分析,识别干扰类型、强度及来源;干扰预测模块采用深度学习模型结合历史数据和实时数据,预测未来干扰变化趋势;策略决策模块根据干扰识别和预测

结果,结合通信业务需求,制定最优的干扰抑制策略,如频谱调整、功率优化、滤波器参数调整等^[10]。

(二) 典型场景下的应用实践

在铁路LTE-R通信干扰抑制场景中,系统针对列车牵引系统产生的谐波干扰和民用4G基站的邻频干扰问题,开展应用实践。感知层通过列车上的通信终端采集LTE-R接收信号数据,通过轨道旁的频谱监测设备采集沿线频谱数据,同时采集列车运行速度、牵引功率等数据;智能处理层的干扰识别模块采用随机森林模型,通过提取信号的频域峰值、谐波数量等特征,精准识别牵引谐波干扰和民用4G邻频干扰,识别准确率达到95%以上;干扰预测模块采用LSTM模型,结合列车运行计划和历史干扰数据,预测列车在不同区段的干扰强度,预测误差控制在10%以内;策略决策模块根据预测结果,针对牵引谐波干扰,指令执行层的智能自适应滤波器调整参数,生成抵消信号实现干扰抵消;针对民用4G邻频干扰,指令基站的频谱调整模块动态调整传输功率,降低邻频干扰影响。应用结果表明,该系统可使GSM-R通信信号的误码率从原来的 10^{-3} 降低至 10^{-5} ,通信质量显著提升。

四、结论

铁路通信网络干扰抑制是保障铁路运输安全的关键技术环节,传统方法难以适应复杂多变的干扰环境。本文研究表明,机器学习、深度学习、智能认知无线电及智能自适应滤波等智能化技术,通过精准识别干扰、动态预测干扰、自适应调整抑制策略,能够有效提升铁路通信网络的抗干扰能力。通过构建“感知-智能处理-执行-应用”的分层智能化干扰抑制系统,在铁路LTE-R通信、列控与通信系统耦合干扰等场景中取得了显著应用成效,降低了通信误码率和干扰强度。同时,本文也明确了当前技术应用面临的数据质量、实时性与兼容性等挑战,提出了轻量化算法、联邦学习与多技术融合等发展方向。

参考文献

- [1] 樊金龙. 无线网络高效协作MIMO在铁路通信领域的应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22(11): 59-65+90.
- [2] 安海星. 信息化铁路建设中通信网络的完善探讨[J]. 数字通信世界, 2025, (09): 42-44.
- [3] 张雪. 铁路通信网中网络安全技术的应用实践[J]. 网络安全技术与应用, 2025, (09): 105-107.
- [4] 叶晓冲. 铁路通信系统中GSM-R网络干扰问题分析与解决策略[J]. 价值工程, 2025, 44(20): 82-84.
- [5] 王俊, 廖俊. 基于本地部署人工智能模型的GSM-R网络干扰识别与优化研究[J]. 铁道通信信号, 2025, 61(07): 1-7.
- [6] 袁张付, 宋宗莹, 王兴中, 周一鸣. 基于深度神经网络的铁路通信系统频谱感知方法[J]. 电信科学, 2025, 41(09): 108-118.
- [7] 陈枫. 绿色铁路通信设备设计与可持续发展研究[J]. 中国设备工程, 2025, (08): 116-118.
- [8] 韩昱志. 基于图布局技术的铁路车站通信网图可视化系统设计研究[J]. 铁道通信信号, 1-7.
- [9] 王文斌, 明嘉辉, 郝小光, 郭瑞彬, 王兴中, 权伟. 新一代铁路通信网络技术的应用现状与展望分析[J]. 无线电通信技术, 2025, 51(02): 224-231.
- [10] 马腾飞. 5G技术在高速铁路通信中的应用[J]. 大众标准化, 2025, (01): 146-148.