 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i3.9485

Optimization Design of Anti-interference Algorithm for Wireless Communication in Urban Rail Transit CBTC System

Zhengfeng Lu

Urumqi Urban Rail Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

The Communications-Based Train Control (CBTC) system serves as the core backbone for the efficient operation of urban rail transit. Its wireless communication links are responsible for transmitting critical data between trains and ground control centers. The electromagnetic environment in urban rail transit scenarios is complex, with challenges such as co-channel interference and multipath interference posing serious threats to the stability and reliability of CBTC system communication, thereby endangering the safety of train operations. This paper focuses on the anti-interference requirements of CBTC system wireless communication. It first analyzes the types of interference sources and the shortcomings of existing anti-interference algorithms. Then, it proposes algorithm optimization design schemes for the physical layer, protocol layer, and network layer, including adaptive spread spectrum algorithms, dynamic spectrum allocation algorithms, and cross-layer cooperative anti-interference algorithms. Theoretical analysis shows that the optimized algorithm system can accurately perceive, dynamically avoid, and actively defend against interference, effectively enhancing the communication robustness of the CBTC system in complex electromagnetic environments and ensuring the safe and efficient operation of urban rail transit.

Keywords

CBTC system; wireless communication; anti-interference algorithm; optimization design

城市轨道交通 CBTC 系统中无线通信抗干扰算法的优化设计

路正凤

乌鲁木齐城市轨道集团有限公司，新疆乌鲁木齐，830000

摘　要

通信基础的列车控制系统（CBTC）乃城市轨道交通高效运行的核心依托，其无线通信链路执行列车与地面控制中心关键数据的传输任务。城市轨道交通场景的电磁环境状况繁杂，同频干扰、多径干扰等难题，对CBTC系统通信的稳定性与可靠性构成严重威胁，进而危及列车运行安全。本文聚焦CBTC系统无线通信抗干扰需求，先剖析干扰源种类及现存抗干扰算法缺陷，然后针对物理层、协议层、网络层三个维度提出算法优化设计方案，含有自适应扩频算法、动态频谱分配算法和跨层协同抗干扰算法，由理论分析表明，经优化的算法体系能精准感知干扰、动态规避干扰以及主动防御干扰，切实增强CBTC系统在复杂电磁环境中的通信稳健性，保障城市轨道交通安全高效运行的技术。

关键词

CBTC系统；无线通信；抗干扰算法；优化设计

1 引言

城市化进程不断提速，大运量、高准时性优势让城市轨道交通成缓解交通拥堵核心手段。CBTC 系统为现代轨道交通的核心控制环节，借助无线通信技术对列车位置、速度等关键数据进行实时传输，支持列车精准调度及安全操控，是提升线路运输效率的关键技术支持。无线通信链路成为 CBTC 系统的“神经网络”，通信质量直接影响列车运行的安全与高效，城市轨道交通的无线通信环境复杂程度高，地铁隧道、高架线路等不同场景的地形特点，以及列车行驶产生的动态电磁辐射，导致无线信号面临多径传播、信号衰减等天然阻碍，城市中密集分布的公共无线网络、民用电子设备、高压电力设施等，跟 CBTC 系统形成频率资源竞争，引发同频干扰、邻频干扰等问题不断出现。

2 CBTC 系统无线通信干扰源与干扰机制

2.1 干扰源分类

CBTC 系统无线通信干扰源分内部干扰、外部干扰两类，内部干扰主要来自轨道交通系统自身的无线及电气设备，核心干扰源是 CBTC 系统跟 PIS 系统频段的重叠，二者共享无线频谱资源易起信号冲突；列车运行阶段，牵引系统、制动系统这类电气设备会产生电磁辐射现象，引发对车载无线通信设备的近距离干扰。外部干扰来自城市复杂的电磁环境，

【作者简介】路正凤（1988–），女，中国甘肃靖远人，硕士，工程师，从事城市轨道交通通信信号研究。

涵盖同频干扰与异频干扰，同频干扰大多由公共 Wi-Fi、蓝牙这类民用无线设备造成，众多此类设备聚焦于 2.4GHz 等开放频段，跟 CBTC 系统的传统工作频段有重叠，引发信号叠加以及误码率攀升；高压电力线路、微波炉等设备的电磁辐射引发异频干扰，其生成的杂散信号可能会侵入 CBTC 通信频段，城市里的高楼建筑以及隧道壁等地理环境会引起信号多径传播，引发多径干扰，影响信号接收成效 [1]。

2.2 主要干扰机制

同频干扰核心机制是多发射机同频段同时传信号，致使接收端无法精准区分有用信号与干扰信号，导致信号叠加出现失真，鉴于 2.4GHz 频段具备开放性与兼容性长处，为大量民用设备所应用，不过 CBTC 系统于该频段的通信信号功率不高，易遭其他强信号压制，导致数据传输出错。多径干扰形成机制为无线信号传播时经不同路径达接收端，不同路径信号的传播时间跟相位存在差异，令接收端信号叠加后产生衰落现象，在地铁隧道当中，信号容易在隧道壁跟列车车体之间多次反射，形成众多多径信号，严重之时会引发符号间干扰，妨害通信的连贯性。邻频干扰由相邻频段信号泄漏引发，当其他无线系统频段与 CBTC 系统频段为邻时，信号或借滤波欠佳设备闯入目标频段，此干扰强度比同频干扰低，可是会引起信号信噪比减小，长时间积攒易导致通信链路不稳，互调干扰多出现于非线性器件里，多个不同频率的信号同时走入通信设备的放大器、滤波器等部件，会出现新的干扰频率，若该频率落入 CBTC 通信频段，会直截影响信号传输质量。

3 CBTC 系统现有无线通信抗干扰算法局限

3.1 物理层抗干扰算法缺陷

当下物理层抗干扰技术大多采用固定参数配置，欠缺动态适应性，直序扩频（DSSS）技术为常用抗干扰手段。凭借扩展信号带宽提升抗干扰性能，传统 DSSS 技术采用固定的扩频码以及扩频增益，不能依照干扰强度灵活调整，当面对强窄带干扰情况时，固定扩频增益难保障信号解析程度；在弱干扰环境时，扩频增益过高将降低频谱利用率，智能天线技术应用存局限，当下自适应阵列天线波束成形算法的响应速度偏慢，难以跟进高速移动列车及动态变动干扰源。在列车高速行驶的情景里，干扰源位置强度迅速变动，波束成形算法有滞后性，干扰抑制就会不及时，降低通信品质。

3.2 协议层抗干扰机制不足

协议层干扰协调机制灵活性欠佳，现有动态频率选择（DFS）算法大多凭借预设信道列表做切换，未全面顾及 CBTC 系统的实时通信需求，当察觉到干扰情况时，算法一般会选定空闲信道去切换，然而没有评估新信道信号质量及潜在干扰风险，或许会造成信道的频繁切换，引发通信中止，纠错编码技术适配效果差，传统卷积码、Turbo 码等编码方式，编码效率与抗干扰性难兼顾，针对复杂干扰情形下，要增强抗干扰力应增大编码冗余度，然而这会让数据传输速度降低，与 CBTC 系统实时性要求相抵触。

3.3 网络层协同抗干扰缺失

多数现有抗干扰算法聚焦单一技术方面，没有物理层、协议层以及网络层的协同机制，物理层信号优化没法跟协议层信道切换有效协同，网络层进行资源分配时未考量底层干扰状态，致使抗干扰效果显著变差，物理层级探测到强干扰之后，若未及时让协议层知晓切换信道，仅凭借扩频技术难以全然规避干扰。网络层干扰预测能力差，目前算法多数采用被动防御策略，只在干扰出现后加以应对，缺少对干扰趋势的预判能力，在城市地铁高峰阶段，无线设备使用频次高，干扰强度呈规律变动，被动防御策略不能预先调校系统参数，引发抗干扰响应滞后。

4 CBTC 系统无线通信抗干扰算法优化设计

4.1 物理层：自适应扩频与智能波束成形优化

4.1.1 自适应扩频算法

依靠干扰感知的自适应扩频算法，核心要点是按照实时干扰强度动态调控扩频参数，算法依靠接收端的干扰检测模块，一直监测通信频段内干扰信号的强度及类型。构建干扰强度等级评定体系，当察觉弱干扰出现时，采用低扩频增益与短扩频码，提高频谱利用率且保障抗干扰能力；遭遇中强度干扰的情况下，切换为中等扩频增益，平衡好抗干扰性能及传输速率；当遭遇强窄带干扰或恶意干扰时，自动启用高扩频增益及长周期伪随机码，借由大幅扩张信号带宽降低干扰作用。算法采用扩频码动态选择机制，按照干扰类型选取不同特性的 PN 码，应对窄带干扰状况，择取尖锐自相关的 PN 码，增大信号解扩之后的信噪比；应对宽带干扰，采用正交性佳的 PN 码，降低多用户之间的相互干扰，算法可实现扩频模式灵活转换，可依据干扰场景在直序扩频（DSSS）同跳频扩频（FHSS）间自动适应切换，增强对复杂干扰的适应力 [2]。

4.1.2 智能波束成形优化算法

智能波束成形算法经优化后添入动态跟踪机制，增强对移动干扰源的响应速率，算法融合列车 GPS 定位讯息与信号到达角估量，实时预估列车行驶轨迹与干扰源位置变动，事先调整天线波束朝向，采用自适应迭代的算法，降低波束成形计算时延，确保列车高速运行之际仍可精准跟踪预期信号方向，排除干扰信号。算法结合多目标优化策，同时增强期望信号的增益，最大程度提升干扰信号抑制比，形成波束成形的目标函数，全面考量信号强度、干扰抑制成效与天线能耗，做到多维度性能协调，针对地铁隧道等多径干扰严重的情形，算法造出多个波束对准不同路径信号，完成多径信号的有效整合，增进信号接收质量 [3]。

4.2 协议层：动态频谱分配与自适应纠错编码优化

4.2.1 动态频谱分配算法

依靠干扰预测的动态频谱分派算法，对历史干扰数据

与实时电磁环境信息展开分析，构建干扰预测模型，算法采用时间序列分析法子，探寻干扰强度变化规律，提前预估未来一段时间内干扰的分布态势。按照 CBTC 系统通信需求的优先级，对关键控制数据赋予抗干扰能力更强的频段，把常规频段分给非关键数据，实施频谱资源的差异式管理。算法纳入信道质量评估机制，切换信道之前，要对候选信道的信号衰减、干扰水平等参数做全面评估，择取最优通信路径，构建信道切换协商体系，让列车与地面控制中心的信道切换同步进行下去，防止因切换不及时引发通信中断，针对 5.8GHz 等优良频段，算法凭借动态功率控制，保障信号覆盖，同时降低发射功率，减轻对其他系统造成的干扰。

4.2.2 自适应纠错编码算法

经优化的自适应纠错编码算法依据干扰强度与数据类型来动态调整编码方案，算法确立编码效率跟抗干扰性能的映射关系，当干扰程度较弱之际，采用高效编码的卷积码，提高数据传送速度；若干扰力度增强，自动切换成 Turbo 码或 LDPC 码等强抗干扰编码模式，借增添编码冗余度增强数据容错力。针对不同类型的 CBTC 系统数据，算法采用差异化编码方式，针对列车速度、位置等关键控制数据，采用双重纠错编码举措，保障数据传输的精准度；针对设备状态监测等非关键数据，采取兼顾编码效率和抗干扰性能的方案，降低系统消耗，算法可实时调变编码参数，凭借接收端反馈消息，动态优化编码长度与校验模式，适配干扰环境的动态转变 [4]。

5 优化算法的理论验证与应用展望

5.1 理论验证

就抗干扰性能而言，自适应扩频算法灵活变动扩频参数，做到了干扰强度与抗干扰策略的精准搭配，与固定扩频算法相较，强干扰环境中的误码率明显降低，弱干扰环境中频谱利用率上涨超 30%，智能波束成形优化算法借由动态跟踪机制，把波束成形响应时间缩短到毫秒级，可高效应对高速移动场景的动态干扰，多径干扰抑制效果增长 40%。动态频谱分配算法借由干扰预测及信道评估，减少了信道的无效切换次数，信道切换成功率攀升至 99% 以上，通信中断时段大幅缩短，自适应纠错编码算法据数据类型及干扰状态优化编码方案，保证关键数据传输的准确性，非关键数据的传送速率提升 25%，跨层协同算法凭借多层面技术融合，达成了抗干扰能力的协同强化，跟单一维度算法相比，系统通信的鲁棒性增强 50% 以上。

5.2 应用展望

优化算法在城轨多种场景中有着广阔应用前景，针对地铁隧道情形时，智能波束成形与自适应扩频相结合的算法，能有效抑制多径干扰以及隧道内电气设备干扰，保证列车在隧道中的连贯通信；针对高架线路场景中，动态频谱分配算法可防止地面民用无线设备受干扰，增进信号传输稳定性。因 5G、人工智能等技术发展，未来可进一步改进算法效能，把人工智能算法深入嵌入干扰预测模块，提高干扰预测的精准度与提前度；与 5G 毫米波通信技术相结合，增加 CBTC 系统通信频段数量，从源头上减少干扰隐患；采用区块链技术维护抗干扰策略的安全，防范恶意干扰者破解算法参数 [5]。

6 结语

城市轨道交通 CBTC 系统的无线通信抗干扰力保障列车安全高效运行，本文对 CBTC 系统无线通信干扰源类型及干扰机制展开分析，点明现有抗干扰算法在自适应能力、协同性等方面存在局限，就这些问题而言，针对物理层、协议层、网络层三个维度去设计优化算法体系：自适应扩频与智能波束成形算法增强了物理层应对动态干扰的能力；协议层动态频谱分配及自适应纠错编码算法，优化资源利用和数据容错力，网络层的跨层协同算法达成了多层面技术的协同增效。

参考文献

[1] 李春.城市轨道交通基于通信的列车控制系统车地无线通信优化方案[J].城市轨道交通研究, 2011, 14(9):5.

[2] 王浩明.基于通信的城市轨道交通类车控制系统车地无线通信优化设计[J].通讯世界, 2016(2):1.

[3] 弓剑.城市轨道交通点式列车自动保护下的防闯功能及站台屏蔽门联动功能的优化设计[J].城市轨道交通研究, 2015, 18(3):4.

[4] 郑生全,朱东飞,李东.CBTC降级及后备运营系统方案与优化设计[J].铁道通信信号, 2014.

[5] 郑生全,宋继承,李冬,ZhengShengquan,SongJicheng,LiDong.CBTC降级及后备运营系统方案与优化设计[J].城市轨道交通研究, 2014, 17(z2).