

# 基于无线局域网的 CBTC 车地无线通信系统 抗干扰性能提升方案研究

赵跟党<sup>1</sup> 张 扬<sup>2</sup>

(1. 西安市轨道交通集团运营分公司,710018,西安;2. 交控科技股份有限公司,100070,北京//第一作者,高级工程师)

**摘 要** 针对城市轨道交通地面高架区域敷设波导管、隧道区域敷设自由波的无线组网方案在高架段发生无线同频干扰的问题,提出了通信信号一体化的无线通信系统抗干扰性能提升方案。即基于自由波和波导管有机融合的车地信息传输,通过高精度的定位配合电子开关切换来提升抗干扰性能。通过实验室和现场试验验证了所提出抗干扰解决方案的有效性,并在北京地铁某线大规模推广应用,可为基于无线局域网的 CBTC 车地无线通信系统抗干扰性能提升作参考。

**关键词** 城市轨道交通;无线局域网;基于通信的列车控制;车地无线通信;抗干扰性能

**中图分类号** U231.7;TN975

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.12.043

## Research on Anti-interference Performance Improvement Scheme of CBTC Vehicle-Wayside Wireless Communication System Based on WLAN

ZHAO Gendang, ZHANG Yang

**Abstract** Targeting the problem of wireless co-frequency interference of wireless network system that lays waveguide in urban rail transit ground elevated area and free wave in tunnel area, a scheme to improve the anti-interference performance of wireless communication system integrating communication and signal is proposed. That is, the vehicle-wayside information transmission based on the organic integration of free wave and waveguide, improving anti-interference performance through high-precision positioning and electronic switch controlling. The effectiveness of the proposed anti-interference solution is verified by laboratory and on-site experiments and is widely applied on certain line of Beijing Metro, providing reference for improving the anti-interference performance of CBTC vehicle-wayside wireless communication system based on WLAN.

**Key words** urban rail transit; WLAN; CBTC; vehicle-wayside wireless communication; anti-interference performance

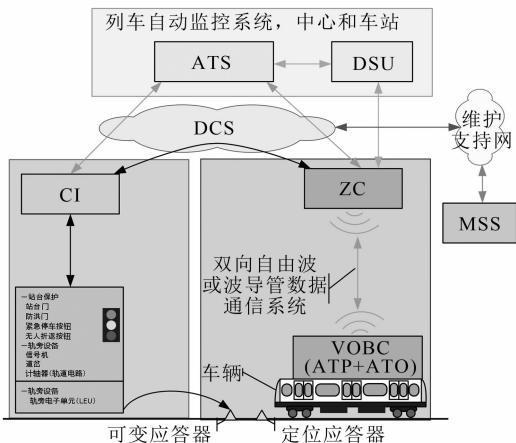
**First-Author's address** Xi'an Rail Transit Group Co.,

Ltd., 710018, Xi'an, China

## 0 引言

随着计算机、通信和控制等技术的发展,基于通信的列车控制(CBTC)系统逐渐成熟并得到广泛应用,目前已成为城市轨道交通列车运行控制系统的主流制式。

CBTC 系统基于列车高精度主动定位和车地双向实时通信实现移动闭塞高密度安全追踪,典型 CBTC 系统架构如图 1 所示<sup>[1-2]</sup>。可靠、大容量的双向车地无线通信是 CBTC 系统的关键因素之一<sup>[3]</sup>。受通信技术和频段制约等影响,在 CBTC 系统推广应用的初期,绝大多数 CBTC 系统选择了运行在公共开放频段的无线局域网(WLAN)技术。



注: ATS 为列车自动监控; DSU 为数据存储单元; DCS 为数据通信系统; CI 为计算机联锁; ZC 为区域控制器; MSS 为维护支持系统; VOBC 为车载控制器; ATO 为列车自动运行; ATP 为列车自动防护。

图 1 CBTC 系统架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CBTC system architecture

采用免费开放频段的策略使 CBTC 系统更早获得了市场认可,但同时也带来无线通信干扰等一系列问题。研究人员在 CBTC 设计初期已意识到无

线通信干扰等问题的可能性,并在传输形式、调制方式及冗余机制的选择上采取了一定的措施<sup>[1]</sup>。文献[2]针对列车控制系统的运行机制,提出从物理层、网络层和管理层防御网络攻击。网络层中捕获防御层和干扰器之间的交互,采用网络层防御策略抵御干扰攻击,为了减轻干扰对列车运行的影响,提出在列车控制过程中根据网络状态调整控车策略,以减小网络干扰对系统的影响。文献[3]提出双网冗余结构叠加安全协议满足安全苛求列控系统在信息传输可靠性和安全性方面的需求。文献[4-5]通过建立抗干扰的办法和评价机制对城市轨道交通内部的同频干扰、邻线干扰进行管理和处置。

为最大程度提升 CBTC 车地信息传输的可靠性,目前无线信息的传输媒介主要采用了自由波、泄露电缆和泄露波导管 3 种方式,部分线路采用了 2 种或更多方式的组合。2013 年,深圳地铁 2 号线和 5 号线因无线通信干扰导致列车多次紧急制动后,针对无线通信系统抗干扰性能的提升问题更加得到了重视<sup>[6]</sup>。

针对乘客无线通信系统、换乘信号干扰、乘客所携带和使用的电子产品造成的干扰以及其他同频信号干扰,可采用频点隔离与补空方式解决 PIS(乘客信息系统)与信号系统的干扰。应加强系统消除非法接入的能力,如 SSID(服务集标识)广播、网关参数设置、增加交换机层数等方案<sup>[7]</sup>。

可采用双网、双信道冗余设计,天线、漏泄同轴电缆和波导管无线覆盖的方式增强抗干扰能力。AP(访问接入点)通过无线信道扫描和监测信道利用率、流量、干扰等信息以动态调整发射功率;采用信道复用技术降低信道使用竞争,以提高信道抢占成功率<sup>[8]</sup>。

需对已投入运营的地铁信号系统车地通信抗干扰的解决方案提出了改造思路,包括轨旁 AP 调整为窄带工作模式、改变 MAC(介质访问控制)层信令结构、替换车载和地面 AP 使得无线设备物理层改造为直序扩频模式<sup>[9]</sup>。

文献[10]则充分利用 LTE(长期演进)技术在抗干扰能力、移动接入性和综合承载方面的优势,建议成本允许的情况下,新线建设和改造应优先选用 LTE 技术。

即便采取了各种措施,因通信干扰问题导致 CBTC 列车紧急制动的现象仍无法完全避免。北

京地铁某线受通信干扰的问题是这一类的典型问题。由于建设较早,采用了基于开放频段的车地无线通信系统,但又由于尚未到改造期,因此无法将全部无线通信系统更换为采用专用频段的 LTE 系统。因此,对北京地铁某线车地无线通信问题的分析和抗干扰性能提升方法的研究,对我国广泛应用的 CBTC 系统性能提升和安全运行保障具有重要的意义。

## 1 因车地通信中断导致列车紧急制动故障的问题分析

### 1.1 问题描述

在北京地铁某线开通初期,不存在无线通信系统中断的问题。随着城市建设的不断发展,上述问题逐渐出现并日益严重。自 2017 年 10 月以来,该线发生多起因车地通信中断导致列车紧急制动故障(见图 2)。列车故障后造成多列后续列车晚点,对运营组织造成极大的压力。

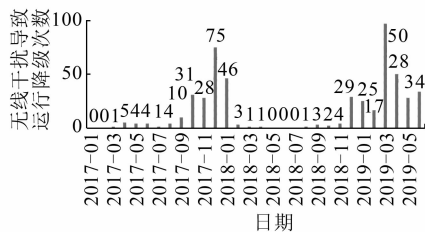


图 2 北京地铁某线无线干扰故障统计

Fig. 2 Wireless interference fault statistics of certain Beijing metro line

从历年的无线干扰故障统计分析,有以下结论:①地点相对固定,万源街站、荣京东街站、同济南路站;②冬天较为高发,故障数从 10 月份开始逐月增加,且故障总数呈逐年增加趋势;③最多时月故障达 100 件,造成运营压力大。

### 1.2 问题分析

针对冬季无线通信故障高发的问题,在室内搭建调试环境,通过高低温试验箱测试设备性能,从室内验证结果找出了设备故障和性能下降的可能性。

针对地点相对固定,提出对相关区域开展无线频段扫描检测。以荣京东街站为例,使用软件(inSSIDer4)监测发现 1 信道无线接入点多达 200 多个,且某信号无线网络覆盖占用信道比率过高(见图 3),导致 CBTC 信号发生重传概率增大,总体时延增大,进而使列车紧急制动概率增大。

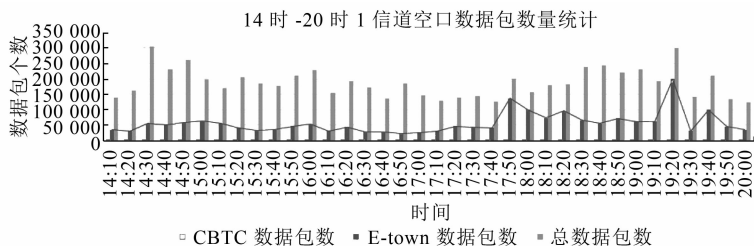


图 3 北京地铁某线无线频段抓包个数对比

Fig. 3 Comparison of packet grabs in wireless frequency band of certain Beijing metro line

北京地铁某线车地无线通信地面高架区域敷设波导管、隧道区域敷设自由波天线,列车单端在车顶和车底各配置 2 个天线以实现与地面设备的通信(见图 4)。车载自由波天线在高架区段接收到其他系统的无线信号增加,导致无线传输中断。推断车载自由波天线在高架区段变成了干扰接收器甚至是干扰放大器。

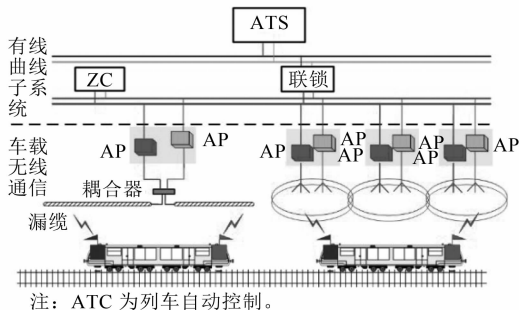


图 4 北京地铁某线车地无线通信架构图

Fig. 4 Vehicle-wayside communication architecture of certain Beijing metro line

## 2 抗干扰性能提升方案

### 2.1 通信信号一体化电子切换方案

针对北京地铁某线在高架线路区段上自由波天线引入外界干扰导致无线通信系统故障的问题,提出在相应区段屏蔽自由波天线的解决思路。但由于在地下或隧道区段还需要基于自由波天线进行正常车地通信,因此,解决方案必须能够根据列车所处位置区段智能化地进行自由波天线的切除和使用。该解决方案的需求为:①当列车处于高架线路区段时,无线通信系统中自动切除自由波天线以排除干扰,使用波导管天线进行信息传输;②当列车处于地下或隧道区段时,将自由波天线接入无线通信系统中,使用自由波通道进行车地信息传输,同时将波导管通道作为备用通道。

本方案设计了 1 个电子开关。它能够根据列车

所处的位置自动控制电子开关的状态,实现对无线通信干扰信号的屏蔽。但由于传统的 CBTC 系统中无线通信系统与信号系统相互独立,无线通信系统无法获知列车位置,从而难以实现该功能。本研究提出通信信号一体化的无线通信系统抗干扰性能提升方案,即信号系统根据列车位置控制电子开关的通断状态,实现对通信系统结构的改变。所提出的车地无线通信架构图如图 4 所示。

列车运营时,默认采用波导管天线和自由波天线双路接收地面无线信号。当列车从隧道区域驶入高架区域时,车载子系统根据列车高精度定位,判断头端车载波导管天线进入切换点后,将车头电子开关切换至自由波隔离状态;判断尾端车载波导管天线进入切换点后,将车尾电子开关切换至自由波隔离状态。当列车从高架区驶入隧道区时,则反之。

车载子系统判断列车丢失定位后,默认控制信号恢复电子开关为正常运营状态。

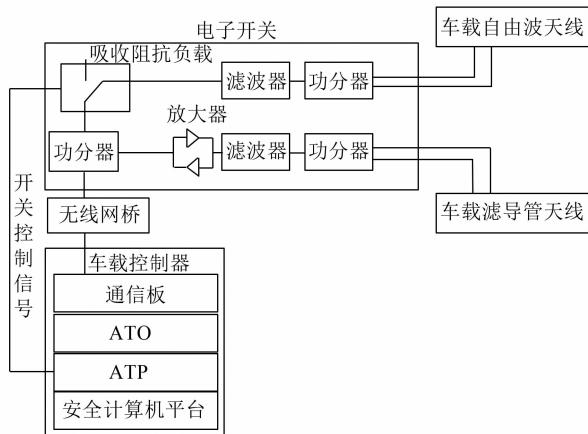


图 5 解决方案的硬件原理图

Fig. 5 Diagram of hardware principle of solution scheme

### 2.2 试验验证

#### 2.2.1 干扰源验证

为了进一步判断干扰源形成的原因,证明电子

切换方案的合理性,在试验室搭建了试验平台(见图6),进行干扰模拟试验。试验方案如下:①模拟1套车地传输的通信链路,并接入车载业务终端和地面业务终端;②引用3个独立的干扰源,与车地通信链路共用;③分别叠加1路、2路、3路的干扰源进行数据传输,观察业务通信质量。实验室测试结果参见表1。

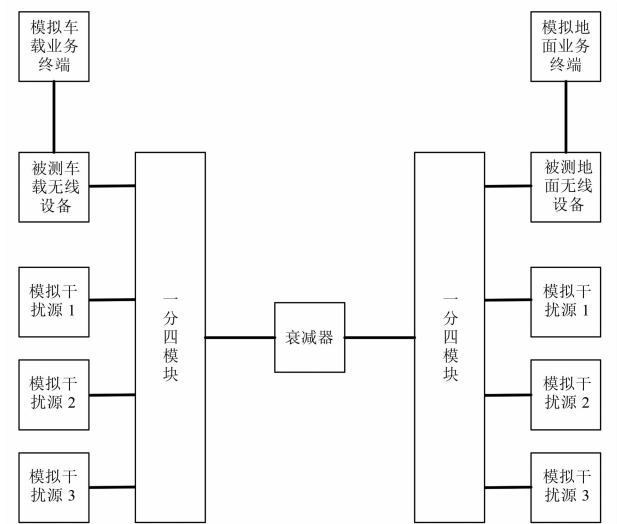


图6 实验室干扰测试平台方案

Fig. 6 Laboratory interference test platform scheme

表1 实验室干扰模拟通信测试结果

Tab. 1 Communication test results under laboratory interference simulation

输入条件	链路	最大延时/ms	丢包率/%
无数据传输	下行链路	5	0
	上行链路	12	0
1路数据传输	下行链路	629	0.43
	上行链路	486	12.99
2路数据传输	下行链路	493	89.95
	上行链路	481	92.50
3路数据传输	下行链路	487	91.30
	上行链路	353	91.50

通过数据分析结果来看,当存在 WiFi(无线网络)同频干扰时,干扰信号的强度不是对通信系统造成影响的决定因素。起决定作用的是同频 WiFi 信号是否有数据传输及数据传输流量。当同频的多个 WiFi 信号同时进行数据传输时,会导致信道竞争加剧,所有的 WiFi 传输均受到信道竞争机制的影响,造成空口传输长时延、吞吐量下降的情况。

2.2.2 解决方案验证

为验证解决方案的可行性,针对提出的解决思路搭建试验平台,如图6所示。

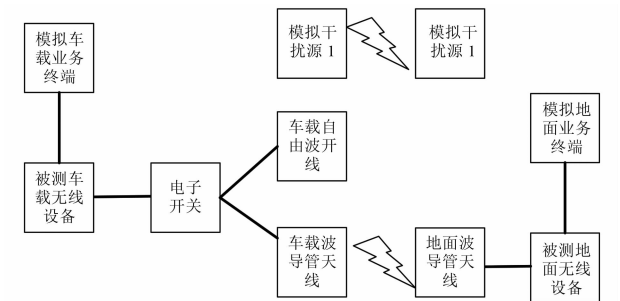


图7 实验室电子切换测试方案原理图

Fig. 7 Schematic diagram of laboratory electronic switching test scheme

模拟列车在高架段运行过程,通过电子开关的闭合过程及通信质量变化,得出测试结果如表2所示。

表2 实验室电子切换下通信测试结果

Tab. 2 Communication test results under laboratory electronic switching

输入条件	链路	最大延时/ms	丢包率/%
电子开关通断在车载自由波	下行链路	582	0.68
	上行链路	528	14.32
电子开关通断在车载波导管	下行链路	20	0
	上行链路	24	0

通过室内试验可知,基于通信信号一体化的电子开关解决方案,可以依据业务通信的特点、基于列车位置信息实时进行传输链路的调整,有助于降低无线干扰的影响。

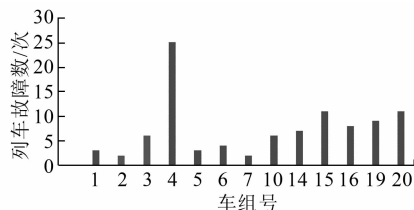
2.3 现场验证

实验室验证干扰原理后,组织开展现场试验验证,在验证了可行性后通过对部分列车改造而逐步投入运营。

已改造的列车投入运营半年后,与其他未改造的列车进行对比,发现已改造的列车在运营中发生的无线干扰导致列车紧急制动次数,相比未改造列车有明显下降。从平局数量来看,已改造的列车紧急制动故障数平均为2.5,未改造的列车紧急制动故障数平均为8.4,已改造的列车相比未改造的列车紧急制动故障率下降了70%(见图8)。

3 结语

随着 WLAN 应用的普及,CBTC 系统所受到的干扰必将不断增加。本文提出的解决方案具有改动小、成本低和见效快的优势,特别是对高架段采用波导管、隧道区域采用自由波天线的线路极有可行性。但本方案并未根本性解决无线通信的干扰



注:已改造的列车车组号为 2、3,其余为未改造的车组号

图 8 改造列车与未改造列车紧急制动故障次数统计图

Fig. 8 Statistical diagram of emergency braking fault times of modified and unmodified trains

问题,建议后续建设的 CBTC 系统尽可能采用独立频段的无线通信系统采用(如采用 LTE 技术),为城市轨道交通安全可靠运行提供保障。

## 参考文献

- [1] 张明远,付靖,宫剑. 基于通信的列车运行控制(CBTC)系统的抗干扰性能分析[J]. 数字通信世界,2019(6):8.  
ZHANG Mingyuan, FU Jing, GONG Jian. Anti-interference performance analysis of CBTC system[J]. Digital Communication World, 2019(6):8.
- [2] ZHU L, LI Y, YU F R, et al. Cross-layer defense methods for jamming-resistant CBTC Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020(6):1.
- [3] 高莺,张琦,陈黎洁,等. 列控-安全信息传输系统可靠性及安全性的形式化分析[J]. 北京交通大学学报,2018(4):61.  
GAO Ying, ZHANG Qi, CHEN Lijie, et al. Formal analysis of reliability and safety of China-Radio in train control safety[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018(2):61.
- [4] 王喜军. 城市轨道交通基于通信的列车控制系统抗干扰性研究[J]. 城市轨道交通研究,2012(9):63.

WANG Xijun. On anti-interference of urban rail transit based on communication train control system[J]. Urban Mass Transit, 2012(9):63.

- [5] 徐锦材,汤燕娴. 关于地铁 2.4 GHz 频段的干扰问题研究[J]. 铁道通信信号,2013(6):63.
- XU Jincai, TANG Yanxian. Research on interference problem of metro 2.4 GHz frequency band[J]. Railway Signalling & Communication, 2013(6):63.
- [6] 蒋志毅. 地铁信号系统无线通信传输抗干扰技术研究[J]. 技术与市场,2017(2):67.
- JIANG Zhiyi. Research on anti-interference technology of wireless communication transmission in metro signaling system[J]. Technology and Market, 2017(2):67.
- [7] 马若声. CBTC 系统无线干扰分析与优化措施[J]. 铁道通信信号,2013(7):70.
- MA Ruosheng. Wireless interference analysis and optimization measures of CBTC system[J]. Railway Signalling & Communication, 2013(7):70.
- [8] 李进. CBTC 系统无线传输系统抗干扰解决方案探讨[J]. 铁路通信信号工程技术,2014(3):57.
- LI Jin. Discussion on anti-interference solution of CBTC wireless transmission system[J]. RSCE, 2014(3):57.
- [9] 顾察君. LTE 技术在中国城市轨道交通车地通信中的应用[J]. 城轨交通,2018(11):51.
- GU Caijun. Application of LTE technology in train-ground communication for urban rail transit[J]. RSCE, 2018(3):51.
- [10] WANG X X, JIANG H L, TANG T, et al. The QoS indicators analysis of integrated EUHT wireless communication system based on urban rail transit in high-speed scenario[J/OL]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2018:1.

(收稿日期:2021-09-16)

## (上接第 204 页)

- [2] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 上海轨道交通市域线机场联络线工程初步设计[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2020.  
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. Preliminary design of airport link line engineering of Shanghai rail transit suburban line[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2020.
- [3] 孙莉. 不同供电制式对轨道交通线路隧道断面的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2012(12):74.  
SUN Li. Influence of different power supply voltage modes on rail transit tunnel cross section[J]. Urban Mass Transit, 2012(12):74.
- [4] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范:TB 10624—2020[S]. 北京:中国铁道出版社,2021.

National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of suburban railway: TB 10624—2020[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021.

- [5] 樊永梅,孙景辉,王海芳. 高速动车组裙板气动翻板设计与研究[J]. 现代制造技术与装备, 2013(2):9.
- FAN Yongmei, SUN Jinghui, WANG Haifang. The design and research of high-speed EMU skirt pneumatic plate[J]. Modern Manufacturing Technology Equipment, 2013(2):9.
- [6] 刘高坤. 铁路车辆疏散仿真方法与应用[J]. 铁道建筑技术, 2021(8):19.
- LIU Gaokun. Simulation method of railway vehicle evacuation and its application[J]. Railway Construction Technology, 2021(8):19.

(收稿日期:2019-12-30)