

地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用研究

包安伦¹, 江松², 李梦豪², 刘嘉诚², 王立新²

1. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430070

2. 中铁建电气化局集团南方工程有限公司, 湖北 武汉 430074

DOI:10.61369/ERA.2025060036

摘要 : 随着城市轨道交通的快速发展, 地铁在城市交通体系中的地位日益重要。车地通信技术作为地铁信号系统的关键组成部分, 对于保障地铁的安全、高效运行起着至关重要的作用。本文从信号技术、安全方面出发, 深入探讨地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用, 分析当前车地通信技术的现状及存在的问题, 提出针对性的优化策略, 并对其应用前景进行展望, 旨在为提升地铁信号系统的性能和可靠性提供参考。

关键词 : 地铁信号系统; 车地通信技术; 优化

Research on Optimization and Application of Train-Ground Communication Technology in Subway Signal System

Bao Anlun¹, Jiang Song², Li Menghao², Liu Jiacheng², Wang Lixin²

1.Wuhan Metro Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430070

2.China Railway Construction Electrification Bureau Group South Engineering Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430074

Abstract : With the rapid development of urban rail transit, the subway is becoming increasingly important in the urban transportation system. As a key component of the subway signal system, train-ground communication technology plays a crucial role in ensuring the safe and efficient operation of the subway. Starting from signal technology and safety aspects, this paper deeply explores the optimization and application of train-ground communication technology in the subway signal system, analyzes the current status and existing problems of train-ground communication technology, proposes targeted optimization strategies, and looks forward to its application prospects, aiming to provide a reference for improving the performance and reliability of the subway signal system.

Keywords : subway signal system; train-ground communication technology; optimization

引言

铁路信号车地通信系统作为列车安全运行的核心支撑, 承担着列车状态实时监测、调度指令精准传输、行车安全保障等关键职能。伴随全球铁路运输向高速化、高密度化方向演进, 传统车地通信技术逐渐暴露出固有局限性。通过车地通信, 列车与地面控制中心能够实时交换信息, 包括列车的位置、速度、运行状态以及地面的行车指令、线路状况等, 从而实现列车的自动控制、安全防护和高效运营。随着地铁运营规模的不断扩大和运营要求的日益提高, 对车地通信技术的性能和可靠性提出了更高的挑战。因此, 研究地铁信号系统中车地通信技术的优化与应用具有重要的现实意义。

一、地铁信号系统中车地通信技术现状

(一) 常见车地通信技术类型

无线局域网 (WLAN) 技术在地铁车地通信领域具有广泛应用, 其基于 2.4GHz 或 5.8GHz 等开放频段, 采用先进的调制解调技术, 可实现较高的数据传输速率, 能够满足地铁信号系统对列车运行状态、控制指令等大容量数据的传输要求^[1]。在基于通信的列车控制系统 (CBTC) 中, WLAN 技术是轨旁自动列车保护 (ATP) 设备与车载 ATP 设备之间数据通信的常用方式。通过在

轨道沿线合理部署无线接入点, 并在列车上配置车载无线设备, 可构建稳定的双向通信链路。

在信号技术方面, WLAN 技术部署灵活性强, 可根据地铁线路实际情况进行灵活调整, 能够适应不同线路环境和运营需求。然而, 该技术在实际应用中也面临诸多挑战。在安全方面, WLAN 工作于开放频段, 易受到乘客携带的电子设备、周边其他无线系统的干扰, 导致通信信号不稳定, 影响数据传输的准确性和及时性。同时, 信号覆盖范围受无线接入点发射功率以及隧道、车厢等遮挡物的限制, 存在覆盖盲区, 可能造成车地通信中断, 进而

影响列车运行安全和信号系统的可靠控制^[2]。

漏泄同轴电缆作为特殊同轴电缆，外导体设有周期性槽孔。电缆内传输信号时，会经槽孔向周边空间辐射，也能接收外界信号。在地铁车地通信场景中，它沿轨道全程铺设，为列车运行提供全程连续通信覆盖。尤其在隧道这类复杂环境下，凭借信号传输稳定、抗干扰能力强的特性，保障通信顺畅。然而，其安装需精确铺设，对施工工艺要求高，后续维护也需专业设备与技术，成本高昂。而且因自身物理结构与传输原理，数据传输速率难以大幅提升，难以满足大数据量传输需求^[3]。

（二）当前车地通信技术存在的问题

地铁运行环境复杂，多种干扰源严重威胁车地通信的信号质量与安全。乘客信息系统（PIS）因与车地无线信号传输系统安装位置临近，且传输数据量大，极易对车地无线信号产生干扰，影响列车控制指令与运行状态信息的稳定传输；同站台换乘场景下，若两条线路信号传输方式相同，本线与另线信号覆盖冲突，会导致信号传输混乱；在开放式无线网络环境中，乘客携带的手机等电子设备，存在致使地铁信号系统重要信息或加密信息泄露的风险，威胁运营安全；地铁高速移动引发的多普勒效应，使列车接收信号频率改变，显著提升系统误码率，降低信息传输的安全性与稳定性^[4]。

随着地铁智能化发展，车地通信在信号技术上面临严峻挑战。列车自动驾驶、实时视频监控等场景对数据传输速率和实时性要求极高，但现有技术难以满足。以无线局域网技术为例，在高速移动状态下，多径效应与多普勒效应使其信息传输速率大幅降低，无法及时传输大量数据，致使列车运行控制响应延迟，影响系统运行效率与行车安全^[5]。

此外，车地通信系统兼容性与扩展性问题突出。不同地铁线路或建设时期采用不同厂家设备与技术标准，导致系统间兼容性差。在线路延伸、换乘站建设或系统升级时，设备与技术难以无缝对接，增加建设与运营成本。同时，随着智能运维、大数据分析等新业务涌现，对车地通信系统扩展性提出更高要求。但现有系统设计时未充分考虑未来业务发展，难以适配新业务接入，限制了地铁智能化发展进程，给信号技术的持续优化与安全保障带来新的难题^[6]。

二、地铁信号系统中车地通信技术优化策略

（一）提升抗干扰能力的优化措施

针对不同的干扰源，采用相应的抗干扰技术和设备。例如，对于信号及乘客信息信号干扰，可以采用频点隔离技术，根据不同频段信号系统特点，合理分配频点，减少干扰；对于同站台换乘频率干扰，可通过分开车地无线信号传输系统中的频点，提升频点使用灵活性，或改变车-地通信方式，如本地使用无线电台方式，相邻线采用感应环线等，同时合理选择定向天线角度，避免站台空间开放和环境复杂产生的干扰；对于电子设备干扰，加强网络安全防护，采用加密技术、访问控制等手段，防止信息泄漏；对于高速移动多普勒效应干扰，应用 OFDM（正交频分复

用）技术，该技术能够有效抵抗信号失真和衰弱，提升信号的抗干扰能力，降低误码率，提高通信系统的准确性。

合理规划无线接入点的位置和覆盖范围，采用冗余设计，确保在部分设备出现故障或受到干扰时，通信仍能正常进行。例如，在采用无线局域网技术时，根据无线电台的覆盖范围，合理计算并布置无线接入点，使相邻的三个 AP 可实现中间无线电台故障时相邻的两个无线电台仍可覆盖该区域，实现无线网络覆盖的双重冗余^[7]。同时，优化信号传输路径，减少信号反射和遮挡，降低干扰的影响。例如，在隧道等环境中，合理选择漏泄同轴电缆或波导管的安装位置和方式，确保信号传输的稳定性。

（二）提高数据传输速率和实时性的优化方法

采用先进的通信协议和技术，提高数据传输速率和实时性。例如，引入第五代移动通信技术（5G）或长期演进技术（LTE）等。5G 具有高数据速率、低延迟、广连接等特点，能够满足地铁车地通信对大数据量实时传输的需求。LTE 技术与传统无线局域网相比，具有延迟降低、分组传送、广域覆盖、高数据速率和移动支持能力强等诸多优势。通过升级通信协议和技术，能够有效提升车地通信系统在高速移动环境下的数据传输性能，确保列车运行状态、控制指令等重要信息的及时准确传输。

对车地通信系统的数据处理和传输流程进行优化，减少数据处理和传输过程中的延迟。采用高效的数据压缩算法，对传输的数据进行压缩，减少数据传输量，提高传输效率^[8]。同时，优化数据缓存和调度机制，确保数据能够按照优先级及时传输。例如，对于列车的紧急制动指令等关键数据，设置高优先级，优先进行传输和处理，保证列车运行的安全。

（三）增强系统兼容性和扩展性的优化策略

相关部门和行业协会应制定统一的地铁车地通信技术标准 and 规范，明确设备接口、通信协议、数据格式等方面的要求，确保不同厂家的设备和技术能够相互兼容。在新线路建设和系统升级时，严格按照统一标准进行选型和设计，避免出现技术不兼容的问题^[9]。例如，规定车地通信系统的无线频段使用规则、数据传输接口标准等，促进不同设备和系统之间的互联互通。

车地通信系统采用模块化和开放式的架构设计，便于系统的扩展和升级。将系统划分为多个功能模块，每个模块具有独立的功能和接口，当需要增加新功能或接入新业务时，只需对相应的模块进行升级或扩展，而无需对整个系统进行大规模改造。同时，开放式的架构能够方便地与其他系统进行集成，如与地铁智能运维系统、大数据分析平台等进行对接，实现数据共享和业务协同，为地铁的智能化发展提供支撑。

三、地铁信号系统中车地通信技术的应用前景

（一）保障地铁信号安全，助力智能化运营

在地铁智能化运营场景下，车地通信技术为信号安全提供了坚实支撑。加密技术在车地通信中发挥着关键作用，例如采用先进的加密算法，对列车运行控制指令、位置信息等重要数据进行加密处理，有效防止数据在传输过程中被窃取或篡改，确保列车

运行指令准确无误地传达，避免因指令错误导致的安全事故，为列车的安全运行奠定基础。

同时，车地通信技术实现了对列车信号的实时监测。通过在列车上部署各类传感器，将列车关键部件的运行数据，如速度、制动状态等，借助车地通信实时传输到地面控制中心。一旦监测到信号异常，系统能够迅速发出预警，地面维护人员可及时采取措施进行处理，有效预防故障的发生和扩大，保障列车的安全稳定运行。

在列车自动驾驶方面，车地通信的高精度定位技术和稳定的信号传输，使列车能够精确获取自身位置和运行方向，实现精准控制。通过实时与地面控制中心进行数据交互，列车能够及时调整运行状态，确保运行的安全性和高效性。

（二）优化信号交互，推动交通系统融合

在地铁与其他交通系统融合的进程中，车地通信技术在信号交互方面发挥着重要作用。与铁路融合时，双方通过统一的信号传输协议和数据交互标准，利用车地通信实现列车运行时刻、轨道占用等信息的实时共享。地铁信号系统能够根据铁路列车的运行情况，提前调整自身列车的运行计划，避免换乘站出现客流拥堵和列车延误，保障乘客的安全换乘^[10]。

与公交系统融合时，公交站台可接收地铁车地通信传来的实时客流数据，公交调度系统根据这些数据合理调整线路和发车频率。同时，地铁信号系统依据公交车辆的实时位置，优化站内换乘引导信号，为乘客提供更加便捷的换乘指引，提升出行体验。

（三）整合通信数据，助力智慧城市交通管理

在智慧城市建设中，地铁车地通信收集的大量数据为城市交

通管理提供了有力支持。通过车地通信，将地铁运行数据，如列车运行轨迹、客流分布等传输至城市交通数据中心，与其他交通方式的数据进行整合分析。

在交通流量调控方面，结合地铁客流数据和路面交通流量信息，城市交通管理系统能够精准掌握交通拥堵点和拥堵时段，通过车地通信向地铁和道路交通信号系统发送调控指令，实现两者的协同工作，有效缓解交通拥堵。

在智能停车管理方面，车地通信与城市停车场管理系统相连，乘客可通过手机获取地铁沿线停车场的实时车位信息并提前预订。地铁信号系统将乘客的停车需求传输至停车场管理系统，便于停车场预留车位并提供精准的停车引导，提高城市停车资源的利用率，推动智慧城市交通管理的智能化发展。

四、结束语

车地通信技术是地铁信号系统的核心技术之一，其性能和可靠性直接影响地铁的安全、高效运行。当前，地铁信号系统中车地通信技术存在抗干扰能力不足、数据传输速率和实时性有待提高、系统兼容性和扩展性差等问题。通过采取提升抗干扰能力、提高数据传输速率和实时性、增强系统兼容性和扩展性等优化策略，能够有效解决这些问题，提升车地通信技术的性能。优化后的车地通信技术在支持地铁智能化运营、助力地铁与其他交通系统融合、推动智慧城市建设等方面具有广阔的应用前景。未来，随着技术的不断进步和创新，车地通信技术将不断完善和发展，为地铁行业的持续发展提供更有力的支撑。

参考文献

- [1] 胥巧丽. 5G 技术在城市轨道交通车地无线通信中的应用 [J]. 中国宽带, 2024, 20(08): 73-75. DOI: 10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2024.08.25.
- [2] 牛志斌. CBTC 系统车地通信数据丢失故障研究 [J]. 交通世界, 2024, (24): 43-45. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.24.012.
- [3] 张扬, 张晋恺, 刘桂宏, 等. 基于自主感知和车车通信技术的全自动运行系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(06): 314-317. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.058.
- [4] 朱力, 唐涛, 龚泰源, 等. 面向城市轨道交通列车控制系统的车车通信技术探讨 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36(06): 13-21.
- [5] 王崇国, 李云. 5G 通信技术在城市轨道交通信号车地通信中的应用探讨 [J]. 数字通信世界, 2022, (09): 130-132.
- [6] 潘威伟. 城市轨道交通车地无线通信技术的演进历程及未来发展 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(08): 149-152. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.08.033.
- [7] 钟俊波. 面向地铁乘客信息系统的车地无线通信技术研究 [D]. 北京交通大学, 2022. DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2022.003506.
- [8] 杜雅茹. 无线网络技术在城轨信号系统车地通信中的应用 [J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2021, 33(04): 17-19. DOI: 10.13920/j.cnki.zztlyzjxyxb.2021.04.006.
- [9] 朱俊, 陶小婧, 张郁, 等. 上海城市轨道交通信号系统车地通信演进研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 46-49+55. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.11.011.
- [10] 贾蕾. 基于 LTE 技术的地铁车地无线通信技术研究 [J]. 数字通信世界, 2021, (06): 112-113.