

铁路机车宽带无线通信设备的可靠性提升探析

高子琴¹ 徐小华² 郭德杰²

1. 中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司 陕西 榆林 719300

2. 天津七一二移动通信股份有限公司 天津 300380

摘要：随着通信技术发展，特别是5G-R（基于5G技术的新一代铁路移动通信系统）试验频率获批及试点落地，铁路机车宽带无线通信设备面临由GSM-R网络向5G-R网络过渡、承载智能驾驶等新型业务，软硬件设计及功能复杂度大幅提升。设备可靠性受设备自身5G适配性、极端环境下5G信号稳定性、5G运维技术水平及网络切片服务质量等因素影响。本文从5G适配的硬件优化、软件升级、设备集成、抗干扰策略等方面提出提升方案，构建5G技术支撑、全流程管理及专业人才保障体系，多维度提升设备可靠性，保障铁路运输安全高效，推动铁路无线通信向数字化、智能化转型。

关键词：铁路机车；无线通信设备；可靠性提升；5G-R；抗干扰策略；保障体系

引言：铁路机车宽带无线通信设备是铁路运输的关键基础设施，承担着调度指挥、信息传递等重要任务，其可靠性直接关系到铁路运输的安全与效率。随着5G-R技术的推进，设备需同时支持超大带宽、超低时延、海量连接等特性，以承载列车超视距视频瞭望、自然灾害与异物监测等新型业务。然而，5G-R设备在复杂工况下面临高频段信号衰减快、多网共存兼容难、高速移动多普勒频偏等新挑战，可靠性问题日益凸显。深入分析5G场景下的影响因素并探索有效提升策略，对保障铁路通信稳定、支撑智能铁路建设具有重要现实意义。

1 铁路机车宽带无线通信设备可靠性的影响因素分析

1.1 设备自身层面因素

硬件设计缺陷直接制约设备可靠性，元器件选型不当会导致性能不足，5G-R射频芯片若未针对铁路2.1GHz专用频段优化，会导致接收灵敏度过高；电路布局不合理会引发信号串扰，基带处理单元与射频单元电路距离过近，可能干扰数据传输；结构防护不足则难以抵御外部环境侵蚀，设备外壳密封性能差会让灰尘、水汽渗入内部，损坏核心部件^[1]。软件系统问题影响设备运行稳定性，5G-R与GSM-R协议兼容不足会导致调度通信业务切换故障；程序兼容性差会导致设备与其他车载系统联动故障，无法正常接收调度指令；容错机制缺失使设备遇到数据传输错误时难以自主恢复，直接陷入死机状态；数据处理延迟会拖慢信息交互速度，关键行车数据无法及时上传下达。信号传输链路不稳定会降低数据传输质量，链路中中继部件性能不足易出现信号衰减，影响通信效果。

1.2 运行环境层面因素

恶劣工况会持续损耗设备元件，对5G设备影响更为显著。高温环境会加速电路板老化，导致元件性能衰减；低温会使5G基带芯片算力下降，无法满足毫秒级时延要求；湿度波动则会引发元件受潮短路，影响设备正常启动。机械振动冲击会破坏设备结构稳定性，机车运行中的颠簸会导致设备内部零部件松动，造成信号传输异常；急加速、急刹车产生的冲击会导致部件接触不良，电源模块与主板接口松动会引发设备突然断电；电磁环境干扰通信信号，机车内部牵引变流器、电机等电气设备产生的电磁辐射，会干扰无线通信设备的信号频段；信号覆盖不均造成通信中断，隧道内信号传播受阻，设备接收不到稳定信号；山区地形遮挡会使信号强度大幅减弱，且不同区域信号切换频繁时，设备难以快速适配新信号，引发短暂通信中断。

1.3 使用与维护层面因素

操作规范性不足易引发设备故障，操作人员未按流程开启设备，会导致内部模块启动顺序混乱，功能无法正常激活；误设置网络切片QoS参数，会使关键业务失去优先级保障。维护管理疏漏让设备隐患积累，日常巡检不到位会遗漏隐性问题，天线表面附着的灰尘未及时清理会削弱信号接收能力；故障排查不及时会让小问题演变为大故障，设备出现轻微信号波动时未及时处理，可能发展为彻底通信中断；备件更换不规范会影响设备性能，更换的射频模块型号与原设备不匹配，会导致信号处理能力下降。难以预判设备寿命会导致部件超期服役，电源模块老化后仍继续使用，可能突然失效造成设备停机。

1.4 通信网络层面因素

网络信号稳定性直接影响设备通信效果，基站信号强度波动会导致设备接收信号时强时弱，郊区基站间距过大易出现信号盲区；跨区域信号切换延迟会造成通信短暂中断，列车高速通过不同基站覆盖区域时，设备无法快速完成信号切换。数据传输协议适配问题导致数据传输异常，5G-R与地面系统MCX协议版本不一致，会使数据格式不兼容，出现丢包现象；协议传输速率不匹配会造成数据积压，地面系统传输速率高于设备接收速率时，部分数据无法及时处理。数据流量过大时，网络带宽不足会限制设备通信效率，关键调度信息无法优先传输，影响行车调度效率。

2 设备自身可靠性提升策略

2.1 硬件优化设计策略

元器件选型升级聚焦适应铁路机车复杂工况，优先选用耐高低温的工业级元件，确保设备在极端温度环境下稳定运行；挑选抗振性能强的元器件，减少机车颠簸对内部部件的影响；搭配高稳定性的核心部件，降低元件自身故障概率。结构防护改进从多维度增强设备耐受性，优化外壳密封设计，采用防水防尘的密封材质，阻隔灰尘与水汽侵入；在设备内部关键部位增加抗冲击缓冲结构，通过弹性组件吸收振动与冲击能量；强化散热性能，设计高效散热通道，搭配散热片或小型散热风扇，避免高温导致元件性能衰减。冗余设计强化针对关键模块，电源模块采用双备份配置，主电源出现故障时，备用电源可自动切换供电；通信芯片基带处理单元采用集成高性能SOC芯片，通信芯片同样设置双备份，确保单一芯片失效时，设备仍能维持通信功能，减少故障对整体运行的干扰；优化接地设计，通过单点接地或多点接地结合的方式，增强电路抗电磁干扰能力，保障信号传输稳定。

2.2 软件系统可靠性提升策略

程序稳定性优化从代码层面减少隐患，梳理并简化冗余代码，降低程序运行负担；强化代码测试环节，覆盖各类工况下的运行场景，提前发现并修复潜在漏洞，减少运行中崩溃的风险。容错与自愈设计提升设备自主应对能力，增加数据校验机制，通过校验码验证传输数据的完整性，发现错误时及时请求重发；设置双模自动切换程序，当5G-R信号强度低于某限值时，迅速切换至GSM-R网络。也可以设置故障自动恢复程序，当设备出现轻微故障时，可自主重启相关模块或切换备用程序，降低单点故障造成的影响。兼容性与适配性升级打破多网壁垒，优化设备软件协议，使其能够适配不同制式的通信网络，实现与各类网络的顺畅连接；针对地面通信

系统的不同版本，调整软件适配参数，避免协议不兼容导致的通信中断。

2.3 设备集成与接口优化策略

模块接口标准化统一连接规格，制定各功能模块的接口尺寸、引脚定义等标准，确保不同批次、不同厂家的模块可顺畅对接，提升连接稳定性，同时便于后期模块更换与维护。信号传输链路优化减少信号损耗，采用低损耗的传输线缆，降低信号在传输过程中的衰减；一体化集成设计简化设备结构，将分散的功能模块整合为一体化单元，减少外部连接节点，降低因接口松动、接触不良引发的故障概率，缩小设备体积，更适配机车有限的安装空间，提升整体运行可靠性。

3 运行环境适配与抗干扰策略

3.1 恶劣工况适应性提升

温湿度防护聚焦设备稳定运行，加装智能温控系统，通过温度传感器联动散热风扇或散热片，调节设备内部温度，避免高温导致元件老化；配置防潮密封组件，在设备接口、缝隙处采用防水密封圈，阻隔潮湿空气侵入，适应机车舱内昼夜温差与湿度波动^[2]。抗振冲击设计强化结构稳定性，采用悬浮式安装结构，通过弹性支架缓冲机车运行产生的颠簸，削弱振动向设备内部传递；加固内部部件连接，核心模块如射频单元、电源模块通过金属支架固定，关键线路采用卡扣式布线，防止振动导致部件松动、线路脱落。防尘防水强化升级防护能力，采用高防护等级外壳，阻挡粉尘进入设备内部，避免积尘影响电路板散热与元件接触；外壳接缝处采用整体式密封设计，防止雨水、洗车水渗入，保障设备在扬尘、潮湿工况下正常运行。

3.2 电磁干扰抑制策略

内部电磁屏蔽减少元件相互干扰，在设备内部关键模块外加装金属屏蔽罩，隔离射频单元与基带处理单元的电磁信号，避免信号串扰影响通信精度；屏蔽罩内侧铺设吸波材料，吸收杂散电磁信号，进一步降低内部干扰。外部干扰隔离优化安装布局，规划设备在机车舱内的安装位置，远离牵引变流器、电机等强电磁辐射源，利用机车舱金属框架形成自然屏蔽，减少外部电磁辐射对设备的影响；抗干扰技术应用提升信号稳定性，采用跳频通信技术，通过动态切换通信频段避开干扰频段，保障信号传输连续；运用扩频技术扩展信号带宽，降低干扰信号对有用信号的影响；在设备电源端、信号输入端加装滤波组件，过滤电网与传输线路中的杂波，减少干扰信号侵入。

3.3 复杂通信环境适配策略

多频段兼容设计拓宽适配范围,设备支持多种通信频段,通过软件控制实现频段自动切换,在平原地区适配高频段提升通信速率,在山区、隧道等信号薄弱区域切换至低频段增强信号穿透力,适应不同区域信号覆盖特点。信号增强与补偿强化接收能力,优化车载天线增益设计,采用高增益定向天线,聚焦信号接收方向,提升弱信号捕捉能力;加装信号放大模块,对接收的微弱信号进行放大处理,使设备在信号覆盖边缘仍能稳定接收数据。切换平滑性优化减少通信中断,改进信号切换算法,提前预测相邻基站信号强度,当前基站信号减弱时,提前与目标基站建立连接,实现无缝切换;优化切换过程中的数据缓存机制,避免切换时数据丢失,减少跨基站、跨频段切换时的通信中断时间,保障通信连续性。

4 可靠性提升的保障体系

4.1 技术支撑体系

研发与测试平台建设为设备可靠性奠定基础,搭建模拟机车运行环境的测试平台,还原高温、低温、振动、电磁干扰等复杂工况,对设备开展全流程全工况验证,提前发现设计与性能缺陷^[3]。平台配备各类检测仪器,精准监测设备在不同工况下的运行参数,为优化设计提供依据。技术标准规范制定统一全流程要求,围绕设备可靠性,明确设计阶段的元器件选型、结构防护标准,生产环节的组装工艺、质量检测标准,测试环节的工况模拟、性能评估标准,让各环节工作有章可循。创新技术引入推动设备迭代升级,密切跟踪无线通信领域的新型传输技术、抗干扰领域的自适应干扰抑制技术、智能监测领域的状态感知技术,结合铁路机车通信需求,将成熟技术融入设备研发,提升设备性能与可靠性。

4.2 管理保障机制

责任分工体系厘清各环节职责,在设备研发环节,研发团队承担可靠性设计责任,确保方案满足工况需求;生产环节,生产部门负责按标准把控组装质量,避免工艺缺陷;运维环节,运维团队承担设备日常监测与故障处理责任,保障设备稳定运行。各环节责任落实到人,避免推诿扯皮。质量追溯机制实现全生命周期管控,为设备建立从元器件采购到成品出厂的全生命周期档案,记录元器件供应商、生产批次、检测数据,生产

过程中的工艺参数、质量检测结果,运维过程中的故障记录、维修情况。一旦出现质量问题,可快速追溯到具体环节与责任人。持续改进机制推动不断优化,定期收集设备运行中的故障数据,分类统计故障类型与发生频率,深入分析问题根源,若是设计缺陷则优化设计方案,若是工艺问题则改进生产流程,形成管理闭环。

4.3 人员能力保障

专业人才培养强化技术支撑,针对设备研发领域,培养兼具无线通信技术与机车工况认知的复合型人才,提升可靠性设计能力;针对维护领域,培养熟悉设备结构、精通故障诊断的技术人才,增强现场问题解决能力。通过理论培训与实操锻炼结合,提升人才专业素养。技能考核与认证确保维护质量,建立维护人员技能考核体系,定期组织复训与再认证,确保维护人员持续掌握标准化维护技术。经验共享机制促进共同提升,搭建行业内技术交流平台,通过线上研讨会、线下经验交流会等形式,让不同单位的技术人员分享设备可靠性提升的实践经验、故障处理技巧,相互借鉴学习,共同提升铁路机车宽带无线通信设备的可靠性管理水平。

结束语

铁路机车宽带无线通信设备可靠性的提升是一个系统工程,需从5G适配的设备优化、复杂环境抗干扰、多网协同组网及全方位保障体系等方面协同推进。通过采用定制化5G硬件、优化协议兼容、应用超级小区等技术,结合全生命周期管理与专业人才培养,可有效解决5G场景下的信号衰减、切换中断等问题,使设备在高速移动、恶劣环境下的稳定运行率极大提升。这不仅能保障铁路通信畅通无阻,更为智能驾驶、全域感知的下一代铁路运输体系提供坚实支撑,推动铁路行业向数字化、智能化跨越发展。

参考文献

- [1]张丽丽.铁路无线通信可靠性分析[J].通信技术,2022(5): 88-92.
- [2]刘利.新一代铁路无线通信标准制定进展[J].现代交通,2023(2): 55-60.
- [3]赵贵普,张悦.现代网络技术在铁路通信中的应用[J].通讯世界,2024,31(04):19-21.