

铁路无线通信系统中多天线技术的应用研究

徐亚任

国能朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司 山西 忻州 034000

摘要: 铁路无线通信系统面临复杂传输环境与多元业务需求挑战,多天线技术凭借空间分集、波束赋形等特性成为关键支撑。本文围绕多天线技术在铁路场景的应用展开分析,阐述其核心原理与铁路通信需求适配性,从车地通信、沿线覆盖、抗干扰等方向探讨关键应用,剖析高速移动、复杂地理环境等适配难点,提出小型化集成化、与新一代技术融合、向智能铁路延伸等发展方向,为多天线技术在铁路通信的深化应用提供参考。

关键词: 多天线技术;铁路无线通信;车地通信;抗干扰;智能铁路

引言: 铁路无线通信系统是保障列车安全运行与高效管理的重要基础设施,其性能直接影响铁路运输的可靠性与服务质量。随着铁路列车运行速度持续提升、业务类型日益多元,传统通信技术难以满足复杂场景下的传输需求。多天线技术通过构建多维度信号传输通道,具备提升信道容量、增强抗干扰能力等优势,成为铁路无线通信技术升级的关键方向。

1 多天线技术在铁路无线通信系统中的应用基础

1.1 多天线技术的核心工作原理

多天线技术通过在发射端与接收端部署多根天线,构建起多维度的信号传输通道。在信号发射阶段,系统将待传输数据流进行拆分,经由不同天线端口独立调制后并行发射^[1]。这一过程并非简单叠加,而是通过空间维度扩展实现信号能量分散,利用不同天线间微小的位置差异形成空间分集效应。接收端采用多天线阵列捕获混合信号后,通过信号处理算法对各天线接收信号进行加权合并,有效抑制信道衰落影响。其信号处理逻辑包含两个关键层面:物理层通过预编码技术优化发射信号波形,使信号能量在传播过程中形成特定方向性;数据链路层则利用信道状态信息反馈机制动态调整接收策略,通过最大比合并、迫零检测等算法实现信号解调。这种分层处理架构既保证了空间资源的充分利用,又通过算法迭代优化提升了系统抗干扰能力,为高速移动场景下的稳定通信奠定基础。

1.2 铁路无线通信系统的通信需求与特性

铁路无线通信系统面临复杂多变的传输环境挑战。列车高速运行产生的多普勒频移效应,导致信道参数快速时变,要求通信系统具备毫秒级响应能力。山区隧道、高架桥等特殊地形引发的信号遮挡问题,迫使系统在覆盖深度与广度间寻求平衡。这些环境因素共同构成对通信技术的严苛考验。从信号传输要求看,铁路业务呈现

多元化特征:列车控制指令等安全相关数据需满足低时延、高可靠传输标准;乘客信息服务等非安全业务则更关注吞吐量与频谱效率。这种差异化需求推动通信系统向全双工、多频段协同方向演进,要求多天线技术既能通过波束赋形增强特定方向信号强度,又能借助空间复用提升系统整体容量,最终实现安全通信与普通通信的有机融合。

2 多天线技术在铁路无线通信系统中的关键应用方向

2.1 列车与地面间通信的多天线应用

2.1.1 列车运行状态数据传输的多天线适配

列车运行状态数据涵盖速度、制动状态、牵引系统参数等关键信息,需持续传输至地面控制中心,多天线技术通过空间分集与功率分配优化,适配此类数据的实时传输需求。结合铁路无线通信的移动特性,多天线技术可动态调整天线阵列的信号发射角度与功率,弥补列车高速移动过程中信道突变带来的传输损耗,确保状态数据传输的连续性。依托信道估计算法,多天线系统可实时适配列车位置变化引发的信道波动,优化数据传输链路,满足列车运行状态监测对数据传输的实时性与稳定性要求,这一适配方式符合铁路通信技术规范中对车地数据传输的核心标准。

2.1.2 车地双向通信的多天线信号增强应用

车地双向通信涵盖地面调度指令下发与列车状态数据上传,信号增强是保障通信质量的关键。多天线技术通过波束赋形技术将信号能量聚焦于列车运行轨迹方向,减少信号扩散带来的能量损耗,提升车地通信的信号强度^[2]。针对铁路线路的线状分布特点,多天线阵列可实现信号的定向覆盖,强化列车行驶区间的信号场强,缓解高速移动场景下的信号衰落问题。通过自适应调整天线波束宽度与方向,可适配列车不同运行速度下的通信需求,保障双向通信链路的稳定畅通,契合铁路车地通信

的高可靠传输需求。

2.2 铁路沿线无线覆盖的多天线应用

2.2.1 复杂路段无线信号覆盖的多天线调控

铁路沿线复杂路段包括隧道、山区等信号传输薄弱区域，多天线技术通过阵列调控实现覆盖优化。隧道内部采用多天线分布式部署，利用天线间的协同传输填补信号盲区，通过信号叠加增强隧道内场强分布，克服封闭空间电磁波衰减问题。山区路段通过多天线波束赋形调整信号覆盖角度，绕开山脉遮挡，延伸信号传输距离，同时抑制多径反射带来的信号干扰。通过动态调控天线发射功率与波束方向，可根据复杂路段的地形特点优化覆盖效果，实现全线路无线信号的连续覆盖。

2.2.2 铁路枢纽区域信号协同的多天线应用

铁路枢纽区域列车密集、业务流量大，信号干扰问题突出，多天线技术通过天线协同实现信号优化。多个天线单元形成协同阵列，合理分配信号资源，避免不同列车通信之间的信号冲突。通过空间复用技术提升枢纽区域的通信容量，满足多列车同时传输数据的需求，优化信号传输效率。依托多天线协同检测算法，可区分不同列车的通信信号，实现信号的精准接收与传输，保障枢纽区域车地通信与地面内部通信的有序开展，适配枢纽区域高密度、高流量的通信场景。

2.3 铁路无线通信抗干扰的多天线应用

2.3.1 外部干扰抑制的多天线技术应用

铁路无线通信易受沿线工业设备、公众通信网络等外部电磁干扰。多天线技术通过干扰抑制算法实现抗干扰优化。利用多天线阵列的空间分辨能力，识别干扰信号的来波方向，通过波束赋形技术将天线主瓣对准有用信号方向，同时将副瓣抑制指向干扰源。例如，当外部干扰信号强度为-70dBm时，通过波束赋形可将干扰抑制比提升20-30dB，降低外部干扰对通信的影响。结合自适应滤波技术，多天线系统可实时过滤外部干扰信号，保留有用信号，提升通信链路的抗干扰能力，保障铁路无线通信在复杂电磁环境下的稳定传输，符合铁路通信抗干扰技术的应用规范。

2.3.2 系统内部信号干扰规避的多天线适配

铁路无线通信系统内部存在多链路、多设备间的信号干扰，多天线技术通过链路适配实现干扰规避。合理规划多天线单元的信号传输时序与频率资源，避免不同通信链路之间的信号重叠，减少内部干扰。通过天线阵列的空间隔离设计，提升不同通信链路的信号区分度，降低同系统内不同设备间的干扰影响。依托动态信道分配算法，多天线系统可根据通信业务类型调整传输参数，适配不

同业务的信号传输需求，规避内部信号干扰，保障系统内部通信的有序与稳定。

3 多天线技术在铁路无线通信应用中的技术难点

3.1 高速移动场景下多天线的适配难点

铁路列车运行速度持续提升，高速移动场景给多天线技术适配带来显著挑战。列车高速移动过程中，信道呈现快速时变特性，信道参数随位置变化快速波动，导致多天线系统难以实时精准捕捉信道状态信息^[3]。例如，当时速达到400公里时，信道相干时间缩短至0.5-1毫秒，传统信道估计算法的更新周期无法满足实时性要求，影响信号调控的及时性与准确性。高速移动还会引发多普勒频移效应，造成信号频率偏移，破坏多天线信号传输的同步性，加剧信号失真与传输损耗。多天线阵列的波束调整速度难以完全匹配列车移动速度，易出现波束跟踪滞后问题，导致信号覆盖偏移，无法稳定捕捉有用信号，适配难度随列车速度提升进一步增大，需依托更高效的信道估计算法突破这一局限。

3.2 复杂地理环境对多天线信号传输的影响及应对难点

铁路线路所经复杂地理环境，对多天线信号传输产生显著干扰，且应对难度较高。隧道、山区等封闭或遮挡区域，电磁波传播受阻，多天线阵列的信号覆盖范围大幅缩减，信号衰减严重，难以实现连续覆盖。山区多径反射现象突出，不同路径信号叠加易造成码间干扰，多天线系统的信号处理算法难以快速分离有效信号与干扰信号，影响传输质量。桥梁、峡谷等区域的强风、暴雨等恶劣天气，会破坏天线阵列的稳定性，导致信号传输波动，多天线的动态调控能力难以完全抵御环境变化带来的影响，如何实现复杂环境下的信号稳定传输成为关键难点。

3.3 多天线技术与铁路现有通信系统的兼容难点

多天线技术与铁路现有通信系统的兼容适配，是其落地应用的重要阻碍。铁路现有通信系统建成时间跨度大，部分系统采用传统单天线传输架构，与多天线技术的传输协议、信号格式存在差异，难以直接实现数据交互与协同工作。现有系统的硬件设备难以支撑多天线技术的信号处理需求，升级改造需兼顾原有系统的正常运行，无法进行全面替换，导致多天线技术的性能无法充分发挥。多天线系统的信号传输频率与现有通信系统可能存在重叠，易引发信号干扰，且缺乏统一的兼容标准，进一步增加兼容适配的技术难度。

3.4 多天线部署与运维的技术难点

多天线技术的部署与后期运维，受铁路线路特性影

响存在诸多技术难点。铁路沿线地形复杂,部分路段空间狭窄,多天线阵列的安装位置受限,难以实现最优部署角度与间距,影响信号覆盖效果与传输性能。多天线阵列由多个天线单元组成,设备数量多、结构复杂,部署过程中需兼顾线路安全与通信需求,施工难度较大。后期运维过程中,天线单元易受沿线环境侵蚀、列车振动等影响出现故障,故障检测与维修难度高,且运维过程需避免影响铁路正常运营,导致运维效率受限,增加多天线系统长期稳定运行的难度。

4 多天线技术在铁路无线通信系统中的应用发展方向

4.1 多天线技术的小型化与集成化发展

多天线技术的小型化与集成化发展,是破解铁路沿线部署空间受限难题的核心路径,契合铁路通信设备轻量化、集约化的发展需求^[4]。小型化发展聚焦天线单元的尺寸压缩,通过新型材料与结构设计,在不降低传输性能的前提下,缩减天线体积与重量,适配铁路沿线狭窄空间、列车车载设备等受限场景的部署需求。集成化发展则侧重多天线与铁路通信其他功能模块的融合设计,将天线单元与信号处理、功率放大等模块整合为一体,简化设备结构,减少设备部署数量,降低施工与运维难度。这种发展方向可有效解决多天线阵列部署空间不足、设备结构复杂等问题,同时提升设备集成度与空间利用率,为多天线技术在铁路场景的广泛落地提供硬件支撑,符合铁路通信设备小型化、集成化的行业发展趋势。

4.2 多天线与新一代铁路无线通信技术的融合方向

多天线技术与新一代铁路无线通信技术的深度融合,是提升铁路通信性能的关键发展方向,依托3GPP标准演进成果实现技术协同升级。新一代铁路无线通信技术聚焦高速率、低时延、高可靠传输需求,多天线技术通过波束赋形、空间复用等核心能力,可有效支撑新一代通信技术的性能落地。两者融合可充分发挥多天线技术的空间维度优势,弥补新一代通信技术在复杂场景下的覆盖短板,同时借助新一代通信技术的灵活调度能力,优化多天线信号处理效率。融合过程中需依托标准化技术规范,统一传输协议与信号格式,实现多天线系统与新

一代铁路无线通信网络的无缝衔接,拓展通信容量与传输速率,满足铁路通信业务的升级需求,推动铁路无线通信向更高质量、更高效能演进。

4.3 多天线技术在智能铁路通信中的延伸应用

随着智能铁路建设推进,多天线技术的应用场景将向多元化延伸,深度融入智能铁路通信各核心环节。智能铁路通信涵盖智能调度、自动驾驶、状态感知等多元化业务,多天线技术可通过精准的信号调控与协同传输能力,支撑这些业务的稳定开展。通过与智能感知模块结合,多天线技术可实现列车运行状态、线路环境等信息的精准采集与高效传输,为智能调度提供数据支撑。在自动驾驶场景中,多天线技术可提升车地通信的可靠性与及时性,保障调度指令的精准传输,助力自动驾驶技术落地。同时,依托算法优化与技术创新,多天线技术可实现与智能运维系统的联动,提升设备故障检测与调控的智能化水平,推动智能铁路通信向泛在化、智能化方向发展,契合移动AI时代铁路通信的发展需求。

结束语

多天线技术在铁路无线通信系统应用中展现出巨大潜力,在车地通信、沿线覆盖、抗干扰等方面发挥关键作用。然而,高速移动场景适配、复杂地理环境应对、与现有系统兼容及部署运维等难点仍待解决。多天线技术向小型化集成化、与新一代技术融合及在智能铁路通信延伸应用等方向的发展,为其在铁路领域的深入应用提供新契机。持续探索创新,推动多天线技术完善,将助力铁路无线通信实现更高质量发展。

参考文献

- [1]吴卫,宋文涛,董昱,等.高速铁路宽带无线通信系统切换方案研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(5):1578-1586.
- [2]杨辰彬.铁路隧道中货运列车无线通信覆盖问题及增强策略研究[J].通信电源技术,2026,43(2):145-147.
- [3]曾仕安,童威,朱丁涛.交通隧道环境下无线信道建模技术研究[J].无线电通信技术,2025,51(6):1272-1278.
- [4]孙活,郭鑫杰,李毅,等.无线通信技术在铁路运输管理中的应用研究[J].通信与信息技术,2025(1):66-67,75.