

铁路通信信号系统多路径干扰抑制技术研究

曹宁哲

广东粤东城际铁路有限公司 广东 汕头 515000

摘要: 铁路通信信号系统是保障铁路运输安全与效率的核心设施,融合通信与信号控制技术,涵盖多个子系统。铁路运行环境复杂,多路径干扰严重影响系统性能,导致信号质量下降、误码率增加和系统稳定性受损。传统抑制技术存在局限,智能天线、自适应滤波和多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)等现代技术展现出优势。本文深入分析多路径干扰影响,综述抑制技术,并探讨智能天线、自适应滤波和MIMO技术在铁路通信信号系统中的应用,为提升系统抗干扰能力提供参考。

关键词: 铁路通信信号系统;多路径干扰;干扰抑制;技术研究

引言:铁路作为国民经济的大动脉,其安全、高效运行至关重要。铁路通信信号系统作为铁路运输的神经中枢,承担着确保列车安全行驶和高效调度的重任。然而,复杂多变的运行环境,特别是多路径干扰问题,对铁路通信信号系统的性能构成了严峻挑战。多路径干扰不仅影响信号质量,增加误码率,还损害系统稳定性,给铁路运输安全带来潜在威胁。因此,深入研究铁路通信信号系统的多路径干扰抑制技术,对于提升系统抗干扰能力、保障铁路运输安全具有重要意义。

1 铁路通信信号系统概述

铁路通信信号系统融合了通信技术与信号控制技术,是保障铁路运输安全、提高运输效率的核心基础设施,通过传输和处理各类信息,实现对列车运行状态的实时监控、调度指挥及行车安全防护。该系统涵盖列车运行控制系统(CTCS)、调度集中系统(CTC)、无线通信系统(如GSM-R)等多个子系统,其中列车运行控制系统依据接收的信号指令,精确控制列车的运行速度和间隔,确保列车按照预定时刻表安全行驶;调度集中系统实现调度人员远程对列车运行进行集中管理和指挥,优化运输组织;无线通信系统为列车与地面、列车与列车之间的语音和数据通信提供可靠的传输通道,保障信息及时传递。各子系统相互协作,共同构建一个复杂而有序的铁路通信信号网络,为铁路运输的高效、安全运行提供坚实的技术支撑^[1]。随着铁路技术的不断发展,铁路通信信号系统正朝着智能化、数字化、网络化的方向迈进,以适应日益增长的运输需求和更高的安全标准。

2 铁路通信信号系统的特点

2.1 高可靠性要求

铁路运输具有高速、大运量、连续作业等特点,通

信信号系统的任何故障都可能导致严重的安全事故和经济损失。故此,铁路运输对通信信号系统的高可靠性提出更高要求,系统必须冗余设计,关键设备和链路采用备份机制,当主用设备或链路故障时,立即切换到备用设备或链路,确保系统的持续、稳定运行。同时,还要求系统具备完善的故障诊断和预警功能,能够实时监测设备的运行状态,及时发现潜在故障隐患并采取相应措施进行处理,将故障影响降到最低。另外,系统的软硬件应经过严格的质量检测和可靠性验证,确保在各种恶劣环境下都能稳定可靠地工作。

2.2 实时性与准确性需求

铁路通信信号系统作为保障铁路运输安全与高效运行的关键支撑,肩负着实时准确地传输和处理海量信息的重要使命。列车位置、速度、运行方向及调度指令等信息如同铁路运输的“神经网络”,时刻传递列车运行的关键状态与调度需求。信息传递的实时性和准确性是列车安全、高效运行的基石。如列车运行控制系统必须实时、精准地获取列车的位置和速度信息,并依据复杂算法精确计算出列车之间的安全间隔,调度人员及时发出科学合理的控制指令,方能保障列车的安全运行。若信息传输出现延迟,列车可能无法在合适时机制动;若信息传递存在误差,列车运行间隔可能过小,将极大增加安全事故发生的风险。因此,系统必须具备高速的数据传输能力,确保信息快速传递;配备高效的信息处理算法,保证信息在规定时间内准确无误地传输和处理。

2.3 抗干扰能力强

铁路运行环境极为复杂,充满电磁干扰、多路径干扰等各种类型的干扰源,其中,电磁干扰主要源自铁路沿线电力设备、通信设备及雷电等自然现象,干扰源产生的电磁波会干扰铁路通信信号系统正常工作,影响

信号传输质量；多路径干扰则是信号传播过程中遇到山脉、建筑物等障碍物发生反射、折射和散射现象，接收端收到多个不同路径的信号并相互叠加、相互干扰，严重破坏了信号的质量和接收效果^[2]。因此，铁路通信信号系统必须采取先进的抗干扰技术和措施以提升系统的抗干扰能力，如采用滤波技术过滤掉干扰信号，采用扩频技术增强信号抗干扰性能，采用分集接收技术提高信号接收的可靠性，有效抑制各种干扰，确保信号可靠传输和接收。

3 多路径干扰对铁路通信信号系统的影响分析

3.1 信号质量的下降

多路径干扰会使接收端接收到的信号幅度、相位和频率发生畸变，导致接受信号质量下降，直接影响铁路通信的可靠性和稳定性。在无线通信系统中，多路径干扰可能导致语音信号出现杂音、断续等现象，影响调度人员与列车司机之间的正常通信；在数据传输中，多路径干扰可能引起数据包丢失或错误，导致数据传输中断或需要重新传输，降低数据传输效率。信号传输质量的下降还可能影响列车运行控制系统对接收信号的准确识别和解读，增加列车运行的安全风险。

3.2 误码率的增加

误码率为接收端接收到的错误比特数与总传输比特数的比例，是衡量数据传输质量的重要指标。多路径干扰会引起信号的波形发生畸变，大幅增加信号的失真程度，从而导致误码率增加。在铁路通信信号系统中，高误码率会导致数据传输的准确性降低，影响系统的正常运行。在列车运行控制系统中，若接收到的调度指令出现误码，可能导致列车执行错误的操作，如错误的速度调整、错误的进路选择等，严重威胁列车运行安全。

3.3 系统稳定性的受损

多路径干扰会对铁路通信信号系统的稳定性产生不利影响。多路径干扰具有随机性、时变性等特性，系统接收到的信号强度和质量会不断变化，可能导致系统的性能出现波动。在无线通信系统中，多路径干扰可能引起信号的频繁衰落，导致通信链路的中断和重新建立，影响系统的连续性和稳定性。此外，多路径干扰还可能引发系统的自激振荡等问题，进一步破坏系统的稳定性。系统稳定性的受损会降低铁路运输的效率和安全性，增加运营成本。

4 多路径干扰抑制技术综述

4.1 传统多路径干扰抑制技术

传统多路径干扰抑制技术在通信行业发展初期发挥了重要作用，主要包括空间分集技术、时间分集技术和

频率分集技术。空间分集技术核心原理是在多个不同位置设置接收天线，不同位置的地理环境和电磁环境差异使接收信号相关性较小，采用最大比合并、等增益合并等技术对接收信号进行合并处理，能够有效提高接收信号的质量，增强信号的抗干扰能力。时间分集技术是将同一信号在不同的时间间隔上重复发送^[3]，多路径干扰的随机性和时变性使不同时间间隔发送信号在传播过程中受干扰情况不同，接收端合并多个时间上的接收信号，能够有效降低多路径干扰的影响，提高信号传输的可靠性。频率分集技术是把信号在不同的频率上进行传输，不同频率的信号在传播过程中受到的多路径干扰特性不同，接收端合并不同频率的接收信号，可大大改善信号质量。然而，这些传统技术存在明显缺点，如空间分集需要多个天线，增加了设备复杂度和成本；时间分集会降低传输效率；频率分集则占用了更多的频谱资源，导致频谱利用率低，难以满足现代通信系统对高效、低成本的需求。

4.2 现代多路径干扰抑制技术进展

随着通信技术的飞速发展，现代多路径干扰抑制技术取得了令人瞩目的显著进展。智能天线技术作为一种基于自适应波束形成的前沿技术，展现出强大的优势。它能够依据信号的入射方向自动且精准地调整天线的波束方向，将天线的主波束精准地对准期望信号方向，确保期望信号能够以最大强度被接收；同时，在干扰信号方向形成零陷，有效抑制多路径干扰，极大提高了信号的接收质量。自适应滤波技术通过自动调整滤波器的参数，使其具备实时跟踪信号和干扰变化的能力。无论多路径干扰如何变化，自适应滤波器都能迅速做出反应，动态调整自身参数，实现对多路径干扰的精准、实时抑制，保证信号传输的稳定性。MIMO（多输入多输出）技术利用多个发射天线和多个接收天线进行信号传输，通过空间复用技术，在同一频段上同时传输多个数据流，大幅提高了系统的频谱利用率，并结合空间分集和波束形成技术，增强了系统的抗干扰能力。这些现代技术性能更高、灵活性更强，能够完美契合铁路通信信号系统对多路径干扰抑制的严苛需求，为铁路通信的安全、高效运行提供了坚实保障。

5 铁路通信信号系统多路径干扰抑制技术研究

5.1 智能天线技术在铁路通信信号系统中的应用

智能天线技术在铁路通信信号系统中展现出极为广阔的应用前景，在列车无线通信系统中，智能天线发挥着不可替代的作用。列车高速运行时，其位置和方向时刻发生变化，智能天线凭借先进的算法和精准的调控能

力,能够依据列车实时的运行位置与方向,自动灵活地调整天线波束方向,使天线主波束始终精准对准基站,确保信号传输的强度和质量;能有效抑制来自其他方向的多路径干扰等干扰信号,极大降低信号传输过程中的噪声干扰。智能天线技术不仅提高了信号的接收强度和质量,还显著降低了误码率,使通信可靠性得到质的提升。在铁路沿线基站布局中,智能天线同样表现出色。它可根据不同方向列车运行情况,实现对各方向列车的精准覆盖,减少信号盲区和重叠区,避免频谱资源浪费,提高频谱利用率。结合波束切换技术,智能天线能根据列车移动速度和方向,快速且无缝地切换天线波束,确保列车行驶过程中通信始终保持连续稳定,为铁路通信信号系统高效运行提供有力保障。

5.2 自适应滤波技术在铁路通信信号系统中的实现

自适应滤波技术为铁路通信信号系统实现对多路径干扰的实时抑制提供了有效的解决方案。在列车运行控制系统的信号接收端,自适应滤波器能够对接收到的复杂信号进行精细处理,其强大的自适应能力可根据输入信号和期望信号的统计特性,自动且智能地调整其滤波系数,使得滤波器的输出尽可能地接近期望信号,同时将多路径干扰等噪声信号抑制到最低程度。如在基于无线通信的列车运行控制系统中,接收端接收信号是一个包含期望调度指令信号并夹杂多路径干扰信号的混合体,自适应滤波器通过持续不断地学习和调整自身参数,逐渐消除多路径干扰的影响,精准地提取出准确的调度指令信号^[4],列车依据正确的调度指令信号方能保障安全、有序地运行。自适应滤波技术可通过最小均方误差(LMS)、递归最小二乘(RLS)法等多种不同算法实现,这些算法具有计算量小、收敛速度快等显著优点,非常适合在铁路通信信号系统这种对实时性和准确性要求极高的场景中应用。

5.3 MIMO技术在铁路通信信号系统中的探索

目前,MIMO技术在铁路通信信号系统中的应用正处于积极探索阶段,其所蕴含的巨大潜力已引起广泛关注。在铁路无线通信复杂且多变的场景中,MIMO技术展

现出独特的优势,可充分利用铁路沿线多个基站及列车上的多个天线传输信号,构建起一个高效、稳定的通信网络。通过空间复用技术,MIMO系统可在同一频段上同时传输多个数据流,大大提高了系统的频谱利用率和数据传输速率。随着铁路通信业务的不断拓展,对数据传输的需求也日益增长,MIMO技术的这一特性能够很好满足铁路通信业务的数据传输需求。同时,MIMO技术的空间分集特性为系统增添了强大的抗干扰能力。通过多个天线接收和发送信号,能有效抑制多路径干扰,确保信号在复杂磁环境中传输的稳定性。另外,MIMO技术与波束形成技术相结合,可进一步提高信号传输质量和覆盖范围。但是,MIMO技术在铁路通信信号系统中的应用还面临着一些挑战,如天线布局的合理性、信道估计的准确性、信号同步的精确性等问题,需要科研人员进一步深入研究并加以解决,以推动MIMO技术在铁路通信领域的广泛应用。

结束语

铁路通信信号系统的安全稳定运行对铁路运输至关重要,而多路径干扰是其面临的关键挑战之一。传统抑制技术虽有一定作用,但已难以满足现代铁路发展需求。智能天线、自适应滤波和MIMO等现代技术为解决多路径干扰问题提供了新途径,展现出巨大潜力。然而,这些技术在铁路通信信号系统中的应用还需进一步研究和实践,以克服面临的挑战,实现更高效、可靠的多路径干扰抑制,保障铁路运输的安全与畅通。

参考文献

- [1]寇亚妮.铁路通信信号系统多路径干扰抑制技术研究[J].通信电源技术,2025,42(12):172-174.
- [2]德忠,蒋绍杰.铁路信号系统施工质量控制技术研究[J].铁道工程学报,2024,41(3):58-64.
- [3]邹柏青,杨绍辉.信号传输可靠性分析及优化策略[J].通信技术,2024,51(5):89-95.
- [4]韩泽宇,梁敬轩.铁路通信信号系统调试与检测方法探讨[J].电子测量与仪器学报,2024,39(2):112-119.