

交通通信工程中无线通信抗干扰技术研究

刘俊

江西省交投养护科技集团有限公司 江西 南昌 330052

摘要: 在交通通信工程中,无线通信系统的稳定运行直接关系到交通调度效率、行车安全及应急响应能力。然而,无线通信易受电磁干扰、多径衰落、同频干扰等因素影响,导致通信质量下降甚至中断。本文首先分析交通通信工程中无线通信面临的主要干扰类型及成因,随后探讨扩频通信、自适应跳频、波束成形、干扰抑制等主流抗干扰技术的原理与应用场景,结合实际案例阐述各类技术在交通通信中的实践效果,最后针对技术应用中的挑战提出优化方向与未来发展趋势,为提升交通通信系统的抗干扰能力提供理论与实践参考。

关键词: 交通通信工程;无线通信;抗干扰技术;电磁干扰;通信质量

1 引言

随着智能交通系统的快速发展,无线通信技术在交通领域的应用愈发广泛,涵盖车联网、轨道交通通信、航空通信、海事通信等多个场景。交通通信工程对无线通信的实时性、可靠性和安全性要求极高,例如车与车(V2V)、车与路(V2I)通信需要在毫秒级时延内完成信息交互,以实现碰撞预警、车道保持等功能;铁路调度通信需确保列车与地面控制中心的连续通信,避免信号中断导致行车事故。然而,交通场景的复杂性使无线通信面临严峻的干扰问题:城市道路中密集的建筑物流会引发多径传播干扰;轨道交通沿线的高压电力线路、电气化设备会产生强电磁干扰;港口、机场等区域存在大量无线设备,易出现同频或邻频干扰。这些干扰会导致数据传输误码率升高、通信链路中断,甚至威胁交通系统的整体安全。因此,研究并应用高效的无线通信抗干扰技术,成为交通通信工程领域的核心课题。

2 交通通信工程中无线通信的主要干扰类型及成因

2.1 电磁干扰

电磁干扰是交通通信中最常见的干扰类型,主要来源于自然环境和人为设备。自然干扰包括雷电、太阳黑子活动等产生的电磁辐射,此类干扰具有随机性和不可预测性,但影响范围有限。人为干扰则更为普遍,如轨道交通中的牵引电机、变流器会产生宽频带电磁噪声;公路旁的高压输电线路、工业设备会泄漏电磁能量;机场、港口的雷达设备、无线电导航系统会与通信设备产生频率重叠干扰。以电气化铁路为例,列车运行时,牵引供电系统的换流过程会产生大量谐波电流,通过辐射或传导方式侵入铁路无线通信频段(如450MHz调度频段),导致通信信号信噪比降低,出现语音失真、数据丢包等问题。

2.2 多径干扰

多径干扰由无线信号在传播过程中经过不同路径(如反射、折射、散射)到达接收端引起,在城市交通、峡谷路段等场景尤为突出。由于各路径信号的传播距离、相位不同,接收端会出现信号叠加或抵消现象,导致信号幅度衰落、码间串扰。

在车联网通信中,车辆高速移动时,周围建筑物、其他车辆会不断改变信号传播路径,多径效应会使接收信号的幅度和相位剧烈波动,严重影响V2X通信的稳定性。例如,在密集城区,多径干扰可使车联网通信的误码率升高1-2个数量级,导致碰撞预警信息传输延迟或丢失。

2.3 同频与邻频干扰

同频干扰指多个无线设备使用相同频率信道时产生的干扰,常见于无线通信资源紧张的场景。例如,机场航站楼内同时运行的数百个Wi-Fi热点、对讲机和地面控制通信设备,若频率规划不合理,会导致同频信号相互叠加,接收端无法正确解调有用信号。

邻频干扰则是由于无线设备的频率滤波特性不完善,导致相邻信道的信号泄漏到目标信道中。在轨道交通通信中,若列车车载电台与沿线基站的频率间隔过小,且设备发射功率控制不当,邻频干扰会使接收灵敏度下降,通信距离缩短。

2.4 人为恶意干扰

人为恶意干扰属于主动性干扰,包括故意发射干扰信号、伪造通信数据等,主要威胁交通通信系统的安全性。例如,在高速公路上,不法分子可能通过发射强功率干扰信号阻塞应急通信频段,阻碍事故现场的救援指挥;在港口通信中,恶意干扰可能导致船舶导航通信中断,引发航行危险。此类干扰具有针对性强、功率大的特点,传统抗干扰技术难以应对。

3 交通通信工程中主流无线通信抗干扰技术

3.1 扩频通信技术

扩频通信技术通过将有用信号的频谱扩展到更宽的频带上,使信号能量分散在广阔的频率范围内,从而降低干扰信号的影响。其核心原理是利用伪随机码对基带信号进行调制,使信号带宽远大于信息带宽,接收端通过相同的伪随机码进行解扩,将有用信号恢复为窄带信号,而干扰信号仍保持宽频特性,被滤波器抑制。

在交通通信中,直接序列扩频(DSSS)技术广泛应用于车联网通信。例如,基于IEEE 802.11p标准的V2X通信采用DSSS技术,将20MHz带宽的信号扩展到5.9GHz频段的75MHz信道中,即使受到窄带干扰,解扩后的信噪比仍能满足通信要求,确保车辆间的实时信息交互。此外,跳频扩频(FHSS)技术在铁路调度通信中表现优异,通过按预设图案周期性改变载波频率,避开固定频率的电磁干扰,如在电气化铁路区段,跳频速率可达每秒数百次,有效规避牵引电机产生的窄带干扰。

3.2 自适应跳频技术

自适应跳频技术是在传统跳频技术基础上,结合实时频谱感知能力,动态调整跳频频率集的抗干扰技术。其工作流程为:通信设备实时监测各频率信道的干扰水平,将受干扰严重的信道从跳频集中剔除,仅在干净信道上进行频率跳变。

在海事通信中,自适应跳频技术被用于船舶与岸基的短波通信。海洋环境中存在大量随机干扰和敌方恶意干扰,系统通过每秒数十次的频谱扫描,识别干扰信道并更新跳频图案,使通信链路的可用度提升至99%以上。在城市轨道交通中,车载电台采用自适应跳频技术后,可避开沿线变电站、高压线产生的固定频率干扰,通信中断率降低60%以上。

3.3 波束成形技术

波束成形技术通过阵列天线调整各阵元的相位和幅度,使无线信号在目标方向形成强方向性波束,同时在干扰源方向形成零点,从而增强有用信号接收强度、抑制干扰。该技术分为自适应波束成形和智能波束成形两类,前者基于接收信号的统计特性动态调整波束方向,后者结合人工智能算法预测干扰位置,提前优化波束图案。

在机场通信中,毫米波雷达与地面通信设备常存在干扰问题,采用波束成形技术的基站可将天线主瓣对准飞机,旁瓣抑制干扰源方向,使通信距离从5公里延长至8公里,误码率降低一个数量级。在高速公路ETC(电子不停车收费)系统中,车道旁的毫米波通信设备通过波束成形技术聚焦于车辆OBU(车载单元),避免相邻车

道车辆的信号干扰,识别准确率从95%提升至99.9%。

3.4 干扰抑制与消除技术

干扰抑制与消除技术通过信号处理算法在接收端分离有用信号和干扰信号,适用于无法通过频率、空间隔离的干扰场景。常见算法包括自适应滤波、盲源分离、干扰对消等。

自适应滤波技术在铁路GSM-R(全球移动通信系统-铁路)通信中应用广泛,通过实时估计干扰信号的特性,生成与干扰反向的补偿信号,抵消接收信号中的干扰成分。某高铁线路测试数据显示,采用自适应滤波后,GSM-R通信的误码率从 10^{-3} 降至 10^{-6} ,满足列车控制系统的高可靠性要求。

在车联网的多用户通信中,非正交多址(NOMA)技术结合干扰消除算法,允许多个用户共享同一频率资源,通过功率域或码域分离信号,即使存在同频干扰,仍能实现高速数据传输,单信道的用户容量提升30%以上。

3.5 认知无线电技术

认知无线电技术通过感知周围无线环境,动态调整通信参数(频率、功率、调制方式),实现“opportunistic”通信,即利用空闲频谱资源传输数据,避免与授权用户或强干扰信号冲突。其核心功能包括频谱感知、频谱决策、频谱共享和频谱切换。

在城市交通的动态频谱管理中,认知无线电技术可使应急通信车在突发事件时,自动检测并占用空闲的广播频段或工业频段,建立临时通信链路。例如,在地震救援中,认知无线电设备能在3秒内识别出未被占用的频率资源,确保救援车辆与指挥中心的连续通信,解决传统应急通信频段易堵塞的问题。

4 抗干扰技术在交通通信工程中的实践案例

4.1 高速公路车联网抗干扰实践

某省在智慧高速公路建设中,针对V2X通信的多径干扰和同频干扰问题,采用“扩频通信+波束成形”融合技术。通过DSSS技术扩展信号带宽至100MHz,降低窄带干扰影响;同时,路侧单元(RSU)配备8阵元智能天线,利用波束成形将信号定向发送至车辆,抑制相邻车道的干扰。

实际测试显示,该方案使车辆在120km/h行驶速度下的通信时延控制在50ms以内,误码率低于 10^{-5} ,碰撞预警信息的传输成功率从82%提升至99.5%,有效减少了高速公路交通事故隐患。

4.2 铁路无线通信抗干扰改造

针对电气化铁路牵引供电系统的强电磁干扰,某铁路局对既有GSM-R通信系统进行升级,引入自适应跳

频技术和干扰抑制算法。系统实时监测各信道的干扰电平,当牵引电机产生的干扰超过阈值时,自动跳至备用信道,并通过自适应滤波器消除残留干扰。

改造后,列车在高速行驶时的通信中断率从2.3%降至0.15%,调度指令的传输时延稳定在200ms以内,满足了铁路行车调度的高可靠性要求,保障了列车的安全运行。

4.3 机场地空通信抗干扰优化

某国际机场为解决航站楼区域的多设备同频干扰问题,采用认知无线电技术实现动态频谱分配。地面控制中心通过频谱感知设备实时监测5G、Wi-Fi、雷达等设备的频率使用情况,为地空通信链路分配空闲信道,并根据干扰变化动态切换频率。

优化后,机场地空通信的信道利用率提升40%,飞行员与塔台的语音通信清晰度从85%提高至99%,避免了因干扰导致的指令误听问题,提升了航班调度效率。

5 抗干扰技术应用中的挑战与优化方向

5.1 技术应用挑战

多干扰源协同应对难度大:交通场景中往往存在多种干扰叠加(如电磁干扰+多径干扰),单一抗干扰技术难以全面解决问题。例如,车联网通信中,同时存在建筑物反射的多径干扰和工业设备的电磁干扰,仅采用扩频技术无法完全消除多径导致的码间串扰。

实时性与复杂度矛盾:交通通信对时延要求严苛,而部分抗干扰技术(如智能波束成形、认知无线电)的算法复杂度高,可能增加信号处理时延。例如,认知无线电的频谱感知过程若耗时超过100ms,将无法满足V2X通信的实时性需求。

成本与兼容性问题:部署多天线、宽频带射频模块会增加设备成本,尤其对于车联网等大规模应用场景,经济性难以平衡。此外,新旧通信系统的兼容性问题突出,如既有铁路通信设备难以直接接入自适应跳频网络,需进行大规模改造。

5.2 优化方向

融合抗干扰技术:将多种抗干扰技术结合,形成优势互补。例如,“认知无线电+自适应跳频”可实现动态频谱资源分配与快速频率切换,同时应对同频干扰和恶意干扰;“扩频通信+干扰消除”能在扩展带宽的基础

上,进一步剔除多径干扰成分。

引入人工智能算法:利用深度学习、强化学习等算法优化抗干扰决策过程。例如,通过训练神经网络预测干扰源的位置和强度,提前调整波束成形方向或跳频图案,减少实时处理时延。某研究团队开发的基于强化学习的自适应跳频算法,使频率切换响应时间缩短至10ms,满足了车联网的低时延要求。

标准化与产业化推进:制定统一的交通通信抗干扰技术标准,确保不同设备间的兼容性。同时,通过规模化生产降低智能天线、宽频带射频模块的成本,推动抗干扰技术在中小城市交通系统中的普及。

6 结论

交通通信工程中无线通信的抗干扰技术是保障交通系统安全高效运行的关键。当前的扩频通信、自适应跳频、波束成形等技术在不同场景中展现了良好的抗干扰效果,但面对复杂多变的交通环境,仍需通过技术融合、智能化升级、标准化推进等方式提升性能。未来,随着人工智能、空天地一体化通信等技术的发展,抗干扰技术将实现从“被动应对”到“主动防御”的转变,为智能交通系统提供更可靠、更安全的无线通信保障。同时,需平衡技术成本与实用性,推动抗干扰技术在各类交通场景中的规模化应用,助力交通强国建设。

参考文献

- [1]刘晶晶.城市交通照明与通信技术协同的效能评估[J].中国照明电器,2025,(02):178-180.
- [2]邓媛.交通通信工程IPRAN技术分析[J].运输经理世界,2023,(25):79-81.
- [3]陶丹,常卓,陈梦丽,等.新形势下第二学士学位招生培养模式研究与实践——以北京交通大学通信工程专业为例[J].科教导刊,2023,(19):7-10.DOI:10.16400/j.cnki.kjdk.2023.19.003.
- [4]萧磊.西安交通大学信息与通信工程学院特聘研究员雷磊实现6G时代的星地网络融合[J].中国高科技,2023,(05):17.
- [5]崔华伟.铁路通信工程施工技术要点及质控管理分析[J].运输经理世界,2022,(25):37-39.