

# 复杂电磁环境下高铁5G-无线网融合通信抗干扰技术

高宏达

中国移动通信集团吉林有限公司 吉林长春 130103

**摘要:** 复杂电磁环境下产生的干扰问题成了制约高铁5G无线网融合通信质量的主要瓶颈。本文对高铁场景电磁环境组成及融合通信干扰特性进行梳理,从组网架构优化、物理层增强、智能干扰控制三个方面总结出目前主流抗干扰技术的研究进展,分析各种技术的适用范围以及存在的不足之处,并且对未来抗干扰技术发展做出预测。本文的主要目的是给高铁5G-无线网融合通信抗干扰技术的优化升级提供理论参考和技术借鉴,促进智能高铁通信系统稳定建设。

**关键词:** 复杂电磁环境; 高铁通信; 5G-无线网融合; 抗干扰技术

## 引言

我国高铁网络快速扩展和智能化升级给通信系统带宽、时延以及可靠性提出了更高的要求,5G和无线网融合通信是适应高速移动场景需求的主要技术途径。但是高铁沿线的电力牵引、多频段叠加、自然电磁现象等造成复杂的电磁环境,使融合通信系统经常遭受同频、邻频、多径等干扰,严重地影响了行车控制和旅客通信体验。目前的抗干扰技术研究已经取得了一些成果,但存在场景适应性差、动态调节能力弱等问题。因此,对有关抗干扰技术的研究现状进行综述,确定发展方向,对促进高铁融合通信技术的改进有重要的现实意义。

## 一、高铁5G-无线网融合通信场景电磁环境与干扰特征

### 1. 高铁场景复杂电磁环境构成

高铁运行环境中电磁环境是多源叠加、动态波动的,干扰源种类繁多,而且影响机制比较复杂,主要可以分成自然干扰和人为干扰两种。自然干扰来自于自然环境中电磁活动,主要是指雷电电磁脉冲和太阳电磁辐射。雷电电磁脉冲有瞬时峰值大、频谱宽度广等特点,它的频带可以跨越0.1Hz到100MHz,很容易通过电磁耦合作用对通信设备造成瞬间冲击,使设备出现短暂故障或者信号中断;太阳耀斑等太阳活动也会引起电离层扰动,破坏高频段信号的传输稳定性,对5G高频段通信造成较大影响。人为干扰是高铁电磁环境的主要干扰源,进一步可以分为内部干扰和外部干扰。内部干扰来自于铁路系统自身的运行环节,电力牵引系统为关键的干扰源,它的正常工作会产生大量的谐波电流,在频域上分布在

400MHz到6GHz之间,和5G以及无线网的主要工作频段高度重叠,经由传导和辐射两种途径入侵通信链路;列车金属车厢构成的封闭电磁环境会引起信号的反射、多径传输,造成接收端信号叠加失真,加重了通信干扰。外部干扰来自于沿线周围环境,主要包括多运营商基站群组造成同频或者邻频干扰、工业设备电磁泄露、施工机械辐射等,隐蔽性的工业干扰以及非法辐射干扰由于来源不明、传播途径复杂,成为干扰排查与控制的难点。不同的高铁运行场合电磁环境差别很大,隧道、峡谷、枢纽车站等地方的干扰特点是不一样的。隧道内部空间封闭、信号传播衰减严重、漏泄同轴电缆和分布式天线布置容易造成信号覆盖重叠,产生同频干扰;峡谷地区地形复杂,信号的反射、折射较多,多径干扰强度较大;枢纽站区人流量大,用户终端数量多,业务需求多样化,极易出现邻频干扰及网络资源竞争冲突,使电磁环境更加恶劣<sup>[1]</sup>。

### 2.5G-无线网融合通信干扰核心特征

5G和无线网融合通信的主要目的就是发挥各自的优点,依靠5G的大带宽、低时延来保证行车控制等关键业务,依靠无线网的覆盖范围广、部署灵活的特点来满足旅客的泛在接入需求,但是融合架构的复杂性又产生了新的干扰特征。频段资源冲突是造成融合通信干扰的主要原因,5G常用的是2.1GHz、3.5GHz频段和无线网的2.4GHz、5GHz频段相邻或者部分重合,在两种网络共同工作的时候很容易产生邻频干扰和同频干扰,使接收信号的信噪比降低,通信质量变差。高速移动性会使融合通信的干扰增加。高铁列车最高时速可以达到350公里以上,终端在5G和无线网之间切换的频率高,切换过程

中信号交叠容易造成干扰，在高速移动的情况下会造成多普勒频偏，从而降低信号的同步精度，增大信号解调的误码率，进而加大干扰的影响。

## 二、高铁5G-无线网融合通信抗干扰技术研究现状

### 1. 融合组网架构优化类抗干扰技术

组网架构优化是提高融合通信抗干扰能力的基本途径，主要思路就是通过准确的网络部署和拓扑优化来减小信号覆盖重叠、减小干扰源耦合。场景适配型分层组网技术是目前的研究热点，它根据高铁不同的电磁环境特点和通信需求，构建起宏基站、微基站、车载室分三级覆盖网络。在高铁线路区间处使用5G宏基站来实现广覆盖，利用自适应站址布局代替传统的“之”字型布置，根据地形特点对基站间距和发射功率进行动态调整，防止信号过量覆盖重合，在隧道内安装漏泄同轴电缆加5G微基站协同覆盖的方式，采用频分复用技术划分5G与无线网的工作频段，从源头上避免了同频干扰，在列车车厢内部建立车载MIMO天线+CPE+小基站的室分系统，复用已有的Wi-Fi基础设施实现5G与无线网的协同覆盖，并且通过车载中继节点隔离外界的干扰，减小链路损耗。切换协同优化技术是应对高速移动干扰的重要方式，其核心就是减少切换次数和提高切换平滑度。多小区合并技术就是把相邻的五个5G基站小区合并成一个逻辑小区，增大单个小区的覆盖范围，减小列车行驶过程中切换的次数，减小切换时产生的干扰；动态切换阈值调整技术根据列车的位置和信号的好坏来改变切换的触发条件，防止不必要的切换发生；预测性切换技术用GPS和北斗定位的数据去预测列车的行进轨迹，提前做好网络资源的预留和切换的准备，提高切换过程的平滑性，减少信号中断的风险。超密集组网和干扰协调技术在枢纽车站等集中区域的应用中取得明显效果。利用部署微型5G基站和无线网AP来达到超密集覆盖的目的，用小区分裂技术减少一个小区内用户数，减小资源争夺、邻频干扰，采用分布式干扰协调机制，依靠相邻小区之间信息的交流，自动调节各个频段的使用以及发射功率，精确控制覆盖范围，防止信号交叉干扰<sup>[2]</sup>。

### 2. 物理层增强类抗干扰技术

物理层增强技术依靠改善信号的传输和处理方式来提高融合通信系统抗干扰的能力，是抗干扰技术体系的重要组成。自适应频谱感知和频段选择技术可以解决频段冲突干扰的问题，该技术利用频谱感知模块实时检测周围的电磁环境，找出空闲的频段和有干扰的频段，在保证5G正常工作的前提下，给5G和无线网分配最合适

的频段。对5G网络来说，可以利用双载波聚合技术把不同的频段结合起来，在不产生干扰的情况下增大网络容量；在无线网中，在2.4GHz频段干扰严重的条件下，可以自动切换到5GHz频段或者用动态信道调制来选择干扰最小的信道进行数据传输。大规模天线和波束成形技术依靠提高信号的定向传输能力、减小信号的外泄以及干扰耦合作用来改善系统性能。Massive MIMO大规模天线阵列依靠多天线共同工作来提高信号增益，采用波束赋形技术把信号的能量集中在目标区域内，从而减小对周围区域的影响；针对高铁高速移动的情况，提出了根据位置信息进行自适应波束形成的方法，在实时得到列车位置信息的基础上提前调节波束的方向和覆盖范围，保证列车在高速移动时始终处于最优波束覆盖区内，减小多普勒频偏、多径干扰等带来的影响<sup>[3]</sup>。车厢内小型化的波束成形天线的布置可以达到信号准确覆盖的目的，从而减小信号外泄、干扰的情况。抗干扰调制解调及编码技术用改进信号的调制、编码方法来提高信号的抗干扰性。在5G网络里，自适应调制编码（AMC）技术依据信号的干扰程度自动调节调制阶数和编码率，在干扰小的时候选用64QAM等高阶调制来提高传输速度，在干扰较大的时候切换为QPSK低阶调制保证通信可靠；无线网中，正交频分复用（OFDM）利用子载波正交性减小子载波间干扰、引入循环前缀（CP）抑制多径干扰，改善信号解调效果。

### 3. 智能干扰检测与管控类技术

随着人工智能和大数据技术的发展，智能干扰检测与管控技术成了抗干扰技术的新发展趋向，它主要依靠实现干扰的实时感知、精确识别及动态抑制来达到抗干扰的目的。智能干扰检测系统是在基站、车载终端、沿线传感器上安装监测模块，实时收集信号强度、信噪比、误码率等重要参数，用大数据分析技术发掘出干扰特征，依靠支持向量机、深度学习等AI算法来完成对干扰类型的识别，准确地把同频干扰、邻频干扰、多径干扰等不同的干扰类型区分开来。干扰溯源和定位技术属于干扰控制的前提，利用信号指纹的干扰溯源技术，创建出各个干扰源不同的信号指纹数据库，把实时收集到的干扰信号特征同数据库做比较，迅速找到干扰源的种类以及位置，提高干扰排查的速度；采用到达时间差（TDOA）、到达角（AOA）定位技术，依靠多个节点协作监测来达到准确定位的目的，给干扰消除给予技术支持。动态干扰抑制技术按照检测并追溯到干扰的方法，及时地调节网络参数，即用动态功率控制技术改善基站以及AP的发

射功率,在保证通信质量的前提下降低信号干扰,使用业务优先级调度机制,把行车控制等重要的业务分配在一个比较大的带宽下,并且不会受到其他业务的影响。另外认知无线电技术的应用给智能干扰控制提供新思路,终端依靠自主感知电磁环境、网络参数自动调节的方式,达到频谱资源共享和高效利用的目的,减小了频段冲突干扰<sup>[4]</sup>。部分研究将边缘计算技术和智能干扰管控结合在一起,在边缘节点做本地数据处理、决策来提高干扰控制的实时性,防止因为核心网络传输延迟导致干扰抑制不及时。

### 三、抗干扰技术应用局限与发展趋势

#### 1. 现有抗干扰技术应用局限

虽然目前高铁5G无线网融合通信抗干扰技术研究已经取得了一定的成果,但是仍然存在着很多不足之处。一是,场景适配性不够,现有的技术大多针对一个或者少数几个场景而设计,并不能很好地适应隧道、峡谷、枢纽车站等不同类型的电磁环境,在复杂的环境中抗干扰效果明显降低;二是,动态调节能力差,对于高速运动所导致的电磁环境迅速变化,现有技术的参数调整速度太慢,无法对干扰进行实时抑制;三是,多技术协同性不好,组网架构优化、物理层增强、智能管控等技术各自独立运行,缺少有效的协同作用,不能发挥出抗干扰的作用。另外成本和兼容性约束也会限制抗干扰技术的推广应用。一方面,高性能抗干扰设备和技术的部署成本较高,在大规模的高铁网络中不能得到普遍的应用;另一方面,现有的抗干扰技术和传统的通信设备存在兼容性问题,升级的时候容易产生设备适配问题,影响网络稳定。隐蔽性干扰的检测与控制依然是行业的问题,目前的技术对低功率、宽频带的隐蔽性干扰识别精度不高,排查效率有待提高。

#### 2. 抗干扰技术发展趋势

未来高铁5G无线网融合通信抗干扰技术会向智能化、协同化、场景化的方向发展。智能化升级属于主要的趋势,依靠运用深度学习、强化学习等先进的AI算法来提高干扰检测、识别和控制的自动化、精确度;借助5G-A通感融合技术,使通信传输和干扰感知二者相互配合,改善其协同性,加强干扰处理的实时性;边缘计算同智能干扰管控相结合,可以减小决策时间,加快干扰的本地抑制速度。多技术协同融合会成为提高抗干扰能力的重要途径,未来的抗干扰技术体系将会建立起组网

架构优化、物理层增强、智能管控一体化的技术体系,用各个技术的深度协同和参数联动来发挥出各自的优势;认知无线电和动态频谱共享技术的发展,可以有效地利用频谱资源,从根源上减小频段冲突造成的干扰。场景化定制化研发会得到更多的重视,根据隧道、峡谷、枢纽车站等不同的电磁环境特点来设计出更符合要求的专属抗干扰方案,提高技术的应用效果。另外,6G和未来无线网融合场景的抗干扰技术提前布局成为研究热点,结合6G超高速率、超低时延、广连接的技术特点,开发新的抗干扰技术来解决在更高的速度、更复杂的电磁环境中遇到的干扰问题;区块链技术的应用可以提高干扰管控的效率和可信度,利用分布式账本来实现干扰数据的安全共享和追溯,从而达到精准定位并有效控制干扰的目的。

### 结语

复杂的电磁环境下的干扰问题属于高铁5G-无线网融合通信发展过程中主要的难题,组网架构优化、物理层增强、智能干扰控制等抗干扰技术给解决问题提供了一条有效的途径。本文对有关技术的研究现状做系统的综述,并分析各种技术的应用局限性,对未来智能化、协同化、场景化的发展做出预测。未来的发展要提高多技术之间互相配合的能力,并且改善技术场景适应性与动态调节能力,克服隐蔽干扰控制难题,还要考虑到成本和技术兼容性要求,在高铁通信系统里把大面积部署抗干扰技术作为一项重要工作,给智能高铁发展带给稳定的可靠的信息传输保证,为交通强国国内政战略推行赋予强有力的技术支持。

### 参考文献

- [1]张引明,胡小球,张文.5G无线高铁站点软件增强助力用户感知提升[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):10-12.
- [2]杜建俊.高铁场景5G无线优化[J].长江信息通信,2025,38(07):180-184+189.
- [3]徐欣.高铁5G无线网络建设策略研究[J].通讯世界,2025,32(04):37-39.
- [4]焦燕鸿,王韬,李富强,等.5G高铁无线网建设关键技术与解决方案[J].电信科学,2020,36(08):151-159.