

# LTE-R宽带信号在铁路通信中的检测与性能评估

薛安镇

国能新朔铁路有限责任公司通信技术分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010399

**摘要:** 本文围绕LTE-R宽带信号在铁路通信中的应用,深入分析其信号特性与铁路通信环境特点,探讨传统及先进信号检测技术,设计检测系统并构建性能评估指标体系。研究表明,针对铁路复杂环境,需合理选择检测算法优化系统;通过多维度指标可科学评估信号性能,为提升LTE-R在铁路通信中的应用水平提供理论与实践支撑。

**关键词:** LTE-R; 铁路通信; 宽带信号; 信号检测; 性能评估

## 1 LTE-R 宽带信号特性与铁路通信环境分析

LTE-R宽带信号特性与铁路通信环境紧密相连,相互影响。在信号特性上,LTE-R采用特定频段,具备良好的传输稳定性与抗干扰能力,不同带宽配置对应着各异的频谱利用率,能满足多样化的数据传输需求。其核心调制技术为正交频分复用(OFDM),结合16QAM、64QAM等高阶调制,不仅有效对抗多径衰落,还显著提升频谱效率与数据传输速率。同时灵活的时频资源分配机制,通过资源块(RB)的动态调配,为语音、数据等业务提供精准高效的支持。而铁路通信环境的复杂性与特殊性,对LTE-R宽带信号传输提出严峻挑战<sup>[1]</sup>。沿线地形地貌复杂,山区的阴影衰落、隧道内的多径效应和反射,导致信号强度衰减、时延扩展;列车高速移动产生的多普勒频移,影响信号稳定性与解调准确性,频繁的基站切换也考验通信连续性;另外,自然电磁干扰与铁路自身设备产生的干扰,以及不同通信系统间的同频、邻频干扰,均会降低信号质量。深入剖析LTE-R宽带信号特性与铁路通信环境特点,是优化铁路通信系统、保障通信质量的关键前提。

## 2 LTE-R 宽带信号检测技术

### 2.1 传统信号检测技术回顾

在LTE-R宽带信号检测技术发展历程中,传统信号检测技术发挥了重要作用。匹配滤波器是一种经典的信号检测方法,它根据已知的发送信号波形设计滤波器,通过与接收信号进行相关运算,在噪声背景下提取有用信号。匹配滤波器能够在白噪声环境下达到最佳的检测性能,在早期通信系统中得到广泛应用。但在复杂的铁路通信环境中,由于存在多径衰落、干扰等因素,其检测性能会受到较大影响。能量检测法也是传统检测技术之一,它通过测量接收信号的能量,并与预设的门限值进行比较来判断信号是否存在。能量检测法不需要已知发送信号的具体信息,实现简单,计算复杂度低。然而该

方法容易受到噪声不确定性的影响,在噪声功率波动较大的情况下,检测结果的准确性难以保证。而且,能量检测法无法区分不同的信号,在多信号环境下不能准确识别目标信号。相关检测法基于信号的相关性原理,利用发送信号与接收信号之间的相关性进行检测。通过计算两者的相关函数,根据相关值的大小判断信号是否存在及信号的时延等参数。相关检测法在一定程度上能够抑制噪声干扰,但同样在面对复杂的铁路通信环境中的多径、干扰等问题时,性能会有所下降。

### 2.2 先进的信号检测算法

为应对铁路通信环境的挑战,先进的信号检测算法不断涌现。最大似然检测(MLD)算法基于接收信号的统计特性,通过计算接收信号在各种可能发送信号条件下的似然函数,选择似然函数最大的发送信号作为估计值。MLD算法在理论上能够达到最优的检测性能,但随着信号星座点数和子载波数量的增加,其计算复杂度呈指数级增长,在实际应用中对设备的计算能力要求极高。迫零检测(ZF)算法和最小均方误差检测(MMSE)算法是基于线性检测的方法。ZF算法通过对信道矩阵求逆来消除信道干扰,实现简单,计算复杂度较低,但在噪声较大时,会放大噪声的影响。MMSE算法在考虑信道干扰的同时,引入了噪声协方差矩阵,通过最小化均方误差来优化检测性能,在一定程度上平衡了检测性能和计算复杂度,更适合实际应用场景。还有基于压缩感知的信号检测算法,该算法利用信号的稀疏特性,通过少量的观测数据恢复原始信号。在LTE-R宽带信号检测中,当信号在某些变换域具有稀疏性时,压缩感知算法能够以较低的采样率获取信号信息,降低数据处理量,提高检测效率,为解决高速移动场景下的信号检测问题提供了新的思路。

### 2.3 检测算法性能比较与选择

不同的信号检测算法在性能上各有优劣,需要根据

实际的铁路通信环境和应用需求进行选择。从检测准确性来看,MLD算法具有最优的性能,能够在理论上最大程度地正确识别信号,但过高的计算复杂度限制其在实时性要求较高的铁路通信场景中的应用<sup>[2]</sup>。ZF算法检测速度快,计算复杂度低,但在噪声环境下性能较差;MMSE算法在噪声抑制和检测准确性之间取得较好的平衡。在计算复杂度方面,MLD算法随着信号维度的增加,计算量急剧上升,需要强大的硬件支持;ZF算法和MMSE算法计算复杂度相对较低,更易于在实际设备中实现。基于压缩感知的算法在处理稀疏信号时,能够有效降低计算量,但对信号的稀疏性要求较高。综合考虑铁路通信环境的复杂性、信号传输的实时性和可靠性要求,以及设备的成本和性能限制,在实际应用中,通常会根据具体情况选择合适的检测算法。

### 3 LTE-R 宽带信号在铁路通信中的检测系统设计

#### 3.1 系统总体架构设计

LTE-R宽带信号在铁路通信中的检测系统需要具备高效、可靠的性能,以适应复杂的铁路通信环境。系统总体架构主要包括信号接收模块、信号处理模块、数据传输模块和控制管理模块。信号接收模块负责接收来自铁路沿线基站或列车上的LTE-R宽带信号,它由天线、射频前端等组成,能够将空间中的电磁波信号转换为电信号,并进行滤波、放大等预处理。信号处理模块是整个检测系统的核心,它对接收模块传来的信号进行检测、解调、解码等处理。在该模块中,会根据选择的信号检测算法对信号进行处理,提取出有用的信息。数据传输模块将处理后的数据传输到相关的设备或系统中,如铁路调度中心、列车控制系统等,确保信息能够及时准确地传递。控制管理模块负责对整个系统进行监控和管理,包括对信号接收模块的参数调整、信号处理模块算法的选择和配置、数据传输模块的流量控制等,以保证系统的稳定运行。整个系统架构采用分层设计理念,各模块之间通过标准化的接口进行连接和通信,便于系统的扩展和维护。考虑到铁路通信的可靠性要求,系统还设计了冗余备份机制,在关键模块出现故障时,能够自动切换到备用模块,确保检测工作的连续性。

#### 3.2 关键模块设计与实现

信号处理模块作为检测系统核心,其设计实现关乎整体性能。硬件上,常选用高性能数字信号处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)。DSP数字信号处理能力强、编程灵活,可实现复杂检测算法;FPGA并行处理与可重构优势显著,能快速适配不同算法需求。以MMSE算法为例,在FPGA实现时,先借导频信号估计

信道参数,再结合噪声协方差矩阵计算权值矩阵,最后经滤波获取估计的发送信号。数据传输模块设计需兼顾速率、可靠性与安全性。铁路通信常用光纤或无线传输技术<sup>[3]</sup>。光纤传输依赖适配的光接口与传输协议保障高速稳定;无线传输则需合理选择频段、调制方式,并运用纠错编码、加密技术,确保数据传输安全可靠。

#### 3.3 系统测试与优化

在完成检测系统的设计与实现后,需要对系统进行全面的测试与优化。系统测试包括功能测试、性能测试和可靠性测试。功能测试主要验证系统是否能够正确实现信号检测、数据处理和传输等功能,通过输入不同类型的测试信号,检查系统的输出结果是否符合预期。性能测试则对系统的关键性能指标进行评估,如信号检测准确率、数据传输速率、误码率等。通过在不同的信道条件下,如模拟多径衰落、多普勒频移、干扰等环境,对系统进行测试,分析系统的性能表现。可靠性测试主要考察系统在长时间运行、恶劣环境条件下的稳定性,通过模拟高温、低温、电磁干扰等极端环境,检测系统是否能够正常工作。根据测试结果,对系统进行优化,如果信号检测准确率不高,可以调整信号检测算法的参数,或尝试更换更适合的算法;如果数据传输速率达不到要求,可以优化数据传输协议,或升级硬件设备;对于可靠性问题,加强系统的防护措施,如增加屏蔽装置、优化散热设计等。通过不断的测试和优化,提高检测系统的整体性能,使其满足铁路通信的实际需求。

### 4 LTE-R 宽带信号性能评估指标体系构建

#### 4.1 评估指标选取原则

构建LTE-R宽带信号性能评估指标体系时,需要遵循一定的原则。首先是科学性原则,评估指标应基于LTE-R宽带信号的传输原理和铁路通信的实际需求,能够准确反映信号的性能特点。指标的定义和计算方法要科学合理,避免主观随意性。其次是全面性原则,评估指标体系应涵盖信号性能的各个方面,包括信号质量、通信可靠性、传输效率等。不能只关注某一个或几个方面,要全面考虑各种因素对信号性能的影响,确保对LTE-R宽带信号性能的评估是完整的。实用性原则也至关重要,选取的评估指标应具有实际可操作性,便于在实际工程中进行测量和计算。指标的数据来源要容易获取,并且能够通过现有的测试设备和技术手段进行准确测量。评估指标应具有一定的通用性,能够适用于不同的铁路通信场景和设备。最后是动态性原则,随着铁路通信技术的不断发展和应用需求的变化,评估指标体系也应能够与时俱进。要根据新技术的应用、新业务的开展,及时调

整和更新评估指标,确保评估体系能够准确反映LTE-R宽带信号的最新性能。

## 4.2 具体评估指标

### 4.2.1 信号质量指标

信号质量是评估LTE-R宽带信号性能的重要方面,主要包括接收信号强度(RSSI)、信噪比(SNR)和误码率(BER)等指标。接收信号强度反映接收端接收到的信号功率大小,它直接影响信号的解调和解码性能。较高的RSSI值意味着信号强度较强,有利于提高通信质量,但过高的信号强度也可能导致设备饱和,产生失真。信噪比是信号功率与噪声功率的比值,它衡量信号在噪声背景下的可检测性。SNR越高,信号越容易从噪声中分离出来,信号检测和传输的准确性就越高。在铁路通信环境中,由于存在多种干扰源,保证足够的信噪比是确保信号质量的关键。误码率是指接收错误的比特数与传输总比特数的比值,它是衡量信号传输准确性的重要指标。低误码率表示信号在传输过程中能够准确地被接收和解码,通信质量良好。

### 4.2.2 通信可靠性指标

通信可靠性对铁路通信至关重要,相关指标包括丢包率、切换成功率和故障恢复时间等。丢包率是指在数据传输过程中丢失的数据包数量与总数据包数量的比值。高丢包率会导致数据传输不完整,影响业务的正常运行<sup>[4]</sup>。在铁路通信中,列车调度命令、运行控制信息等对数据完整性要求极高,必须严格控制丢包率。切换成功率反映了列车在移动过程中,从一个基站覆盖区域切换到另一个基站覆盖区域时通信的可靠性。高切换成功率能够保证列车在行驶过程中通信的连续性,避免因切换失败导致的通信中断。故障恢复时间是指系统在出现故障后恢复正常工作所需的时间,它体现系统的容错能力和可靠性。较短的故障恢复时间可以减少故障对铁路通信的影响,提高系统的可用性。

### 4.2.3 传输效率指标

传输效率指标用于评估LTE-R宽带信号在铁路通信中的数据传输能力,主要有数据传输速率和频谱效率。数据传输速率是指单位时间内传输的数据量,它直接决定了系统能够承载的业务类型和业务量。在铁路通信中,随着视频监控、大数据传输等业务的不断发展,对数据传输速率的要求越来越高。频谱效率是指单位频谱资源上的数据传输速率,它反映了频谱资源的利用效率。在频谱资源有限的情况下,提高频谱效率能够在相同的频段内传输更多的数据,满足铁路通信不断增长的业务需求。通过优化信号调制技术、资源分配算法等,可以有效提高LTE-R宽带信号的频谱效率。

## 结束语

综上所述,LTE-R宽带信号检测与性能评估对铁路通信发展意义重大。本文研究成果为保障铁路通信高效、可靠运行提供了有效方案,但在算法实时性优化、极端环境适应性等方面仍存在挑战。未来,随着技术进步,应进一步探索更先进的检测方法 with 评估手段,推动LTE-R在铁路通信领域实现更广泛、更优质的应用。

## 参考文献

- [1]李春铎,郭强亮,蔺伟.LTE-R宽带移动通信系统调度通信技术方案研究[J].铁道通信信号,2019,55(z1):16-20. DOI:10.13879/j.issn1000-7458.2019-S1.19449.
- [2]于华.双向转发检测技术在铁路数据通信网中的应用[J].铁道通信信号,2021,57(1):51-53. DOI:10.13879/j.issn.1000-7458.2021-01.20486.
- [3]董玉圻.基于孤立森林算法的铁路通信网潜在攻击检测方法研究[J].铁道通信信号,2023,59(7):54-59. DOI:10.13879/j.issn.1000-7458.2023-07.22346.
- [4]杨玉修.多故障环境下的铁路通信中断馈线自动化处理技术[J].环境技术,2021,39(6):195-201. DOI:10.3969/j.issn.1004-7204.2021.06.039.