

地铁无线通信系统中模拟信号处理电路研究

陈 冉 颜晓倩

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 城市轨道交通发展下, 地铁无线通信系统性能要求趋严, 模拟信号处理电路性能决定通信链路多项关键指标。本文聚焦于地铁这一特殊且严苛的电磁环境, 深入探讨了无线通信系统中关键模拟信号处理电路的设计原理、性能挑战与优化策略。文章首先分析了地铁无线通信系统的架构、频段选择及其面临的独特电磁干扰 (EMI) 问题; 随后, 重点剖析了接收前端低噪声放大器 (LNA)、混频器 (Mixer)、自动增益控制 (AGC) 环路以及发射端功率放大器 (PA) 等核心模拟电路模块的功能、设计指标与实现难点; 在此基础上, 针对地铁环境中的强干扰、多径效应和供电波动等问题, 提出了包括高线性度电路拓扑、先进滤波技术、自适应偏置与电源管理在内的综合优化方案。研究表明, 在地铁无线通信系统中, 对模拟信号处理电路进行精细化、场景化的设计与优化, 是提升系统整体鲁棒性和通信质量的关键所在。

关键词: 地铁无线通信; 模拟信号处理; 低噪声放大器; 功率放大器; 电磁兼容; 自动增益控制

引言

城市轨道交通中, 地铁系统作为现代大都市公共交通骨干, 其安全、准点、高效运营高度依赖可靠、实时、高带宽的通信网络。地铁无线通信系统 (MWCS) 承担列车控制 (如CBTC)、调度指挥、乘客信息服务 (PIS)、视频监控 (CCTV) 及紧急救援等多重关键任务, 通常采用专用频段 (如1.8 GHz LTE-M、2.4 GHz ISM或5.8 GHz等) 以避免与公共移动通信网络冲突, 确保服务等级协议 (SLA) 满足要求。现代MWCS普遍采用数字调制解调技术 (如QPSK、16/64-QAM等) 实现高频谱效率数据传输, 但信号在进入模数转换器 (ADC) 之前和从数模转换器 (DAC) 输出之后, 都需经过精密模拟信号处理环节, 即通信系统的“模拟前端” (AFE) 和“模拟后端”, 其性能是系统在复杂电磁环境中正常工作的基石。然而, 地铁环境带来极端电磁干扰、严重多径衰落、有限安装空间与严苛温湿度条件以及高可靠性与安全性要求等独特挑战, 使模拟信号处理电路设计面临巨大压力, 传统通用型AFE设计方案难以满足特定需求^[1]。因此, 开展专项研究具有重要理论价值和工程实践意义, 本文旨在梳理MWCS中模拟电路关键技术并提出优化路径。

1 地铁无线通信系统架构与模拟电路定位

典型的MWCS可分为车载子系统和轨旁子系统两大部分。车载子系统安装在列车上, 负责与轨旁基站 (或接入点AP) 进行双向通信。轨旁子系统沿轨道布设, 形成连续的无线覆盖。从信号流向来看, 一个完整的无线收发链路包含以下主要环节: (1) 接收链路 (Rx Path): 天线→带通滤波器 (BPF)→低噪声放大器 (LNA)→混频器 (Mixer)→中频/基带滤波器→可变增益放大器 (VGA)

/自动增益控制 (AGC)→模数转换器 (ADC)→数字基带处理器。(2) 发射链路 (Tx Path): 数字基带处理器→数模转换器 (DAC)→重构滤波器→上变频混频器→功率放大器 (PA)→带通滤波器 (BPF)→天线。

其中, 核心模拟信号处理电路共同决定了系统的以下关键性能指标 (KPIs): 一是接收灵敏度: 由LNA的噪声系数 (NF) 和整个Rx链路的噪声系数决定, 直接影响系统在弱信号下的通信能力。二是动态范围: 指系统能同时处理最强和最弱有用信号的能力, 由LNA和混频器的线性度 (IP3, P1dB) 以及AGC的调节范围共同决定。这对于应对地铁环境中信号强度剧烈波动 (如进出隧道) 至关重要。三是选择性: 指系统抑制邻道和带外干扰的能力, 主要由各级滤波器的性能决定。四是发射功率与效率: 由PA的输出功率、增益和功率附加效率 (PAE) 决定, 影响通信距离和车载设备的功耗与散热。五是频谱纯度: 由本振 (LO) 相位噪声和PA的非线性失真决定, 影响对邻道的干扰。

2 核心模拟信号处理电路分析与设计

2.1 接收前端: 低噪声放大器 (LNA)

LNA是接收链路的第一级有源电路, 其性能对整个系统的噪声系数起着决定性作用。根据Friis公式, 第一级的噪声系数和增益对系统总噪声系数的影响最大。

2.1.1 设计挑战

在地铁环境中, LNA不仅要面对微弱的有用信号 (可能低至-100 dBm量级), 还需承受来自牵引电网、电机等产生的强带外干扰。这要求LNA必须在保持超低噪声系数的同时, 具备极高的线性度 (高IIP3) 和良好的反向隔离度, 以防止强干扰信号阻塞后级电路或通过LNA反向泄漏到天线^[2]。

2.1.2 关键技术与优化

(1) 电路拓扑选择: 共源共栅 (Cascode) 结构因其高增益、良好反向隔离和适中的噪声性能, 成为主流选择。为了进一步降低噪声, 常采用电感源极退化 (Inductive Source Degeneration) 技术来实现输入匹配, 同时引入负反馈以展宽频带。(2) 高线性度设计: 采用前馈 (Feedforward) 或后馈 (Feedback) 线性化技术, 或者使用跨导增强 (gm-boosting) 技术, 在不显著增加功耗的前提下提升IIP3。(3) 工艺选择: 砷化镓 (GaAs) pHEMT器件因其超低噪声和高电子迁移率, 曾是高性能LNA的首选。但随着CMOS工艺的不断改进, 深亚微米CMOS (如28nm, 14nm) 凭借其高集成度、低成本和良好的RF性能, 已成为主流。设计时需仔细权衡噪声、线性度、功耗和面积。

2.2 频率转换: 混频器 (Mixer)

混频器负责将射频 (RF) 信号下变频至中频 (IF) 或直接下变频至基带 (Zero-IF)。它是一个非线性器件, 其性能直接影响系统的线性度和杂散响应。

2.2.1 设计挑战

地铁环境中的强干扰信号很容易与本振 (LO) 信号在混频器中产生互调产物, 落入接收频带内, 形成阻塞。此外, LO泄漏和偶次谐波失真在零中频架构中尤为突出。

2.2.2 关键技术与优化

(1) 双平衡混频器 (Gilbert Cell): 这是CMOS工艺中最常用的有源混频器结构, 具有良好的端口隔离度和较高的转换增益。通过优化开关管的尺寸和偏置, 可以改善其线性度。(2) 无源混频器: 基于MOS开关或二极管的无源混频器具有极高的线性度和极低的噪声, 但需要高功率的LO驱动, 且转换损耗较大^[3]。在对线性度要求极高的场景下可考虑使用。(3) 校准技术: 对于零中频接收机, 可采用数字辅助的模拟校准技术来补偿LO泄漏和IQ不平衡, 从而抑制直流偏移和镜像干扰。

2.2.3 动态范围管理: 自动增益控制 (AGC)

AGC环路通过动态调整接收链路的增益, 确保送入ADC的信号幅度始终处于其最佳量化范围内, 既不过载也不被噪声淹没。

2.3.1 设计挑战

地铁列车高速运行时, 信号强度会因多径效应和阴影衰落而发生数十dB的快速波动。AGC必须具备足够快的响应速度 (Attack Time) 以防止瞬时过载, 同时又要要有足够慢的释放时间 (Decay Time) 以避免增益随信号的小尺度衰落而频繁抖动, 从而维持解调器的稳定性。

2.3.2 关键技术与优化

(1) 对数域检测: 采用对数放大器进行功率检测,

可以提供极大的动态范围 (> 80dB), 非常适合处理地铁环境中的大信号起伏。(2) 多级分布式AGC: 将增益控制分散到LNA、混频器后的VGA以及ADC前的PGA等多个节点, 可以更精细地管理各级电路的信号电平, 优化整体线性度和噪声性能。(3) 智能控制算法: 结合数字基带处理器的反馈信息 (如误码率BER), 可以实现更智能的AGC策略, 例如在检测到突发强干扰时提前降低增益。

2.4 发射后端: 功率放大器 (PA)

PA负责将已调制的低功率信号放大到足以驱动天线进行远距离传输的功率水平。它是发射链路中功耗最大、非线性最严重的部件。

2.4.1 设计挑战

现代MWCS普遍采用高阶QAM等非恒包络调制方式, 这对PA的线性度提出了极高要求。同时, 车载设备对功耗和散热极为敏感, 要求PA必须具备高效率。此外, PA的宽带特性也需满足系统带宽要求。

2.4.2 关键技术与优化

(1) Doherty架构: Doherty PA通过主从放大器的巧妙配合, 在回退功率 (Back-off Power) 区域仍能保持较高效率, 非常适合具有高峰均比 (PAPR) 的OFDM信号。(2) 包络跟踪 (ET) 与数字预失真 (DPD): ET技术通过动态调整PA的供电电压来跟踪信号包络, 大幅提升效率。DPD则在数字域对PA的非线性进行预补偿, 有效改善线性度。这两项技术常结合使用, 构成高性能PA解决方案的核心。(3) GaN vs. LDMOS vs. CMOS: 氮化镓 (GaN) 器件以其高功率密度、高效率和高耐压特性, 在基站PA中占据优势。但对于功耗和成本更为敏感的车载终端, 硅基LDMOS或先进CMOS仍是主流选择。

3 地铁环境下的综合优化策略

除了对单个电路模块进行优化, 还需从系统层面采取综合措施以应对地铁环境的特殊挑战。

3.1 电磁兼容 (EMC) 与屏蔽设计

电磁兼容 (EMC) 设计是确保MWCS在强干扰地铁环境中可靠工作的生命线。首要策略是实施严格的物理隔离与屏蔽。具体而言, 应对噪声极其敏感的模拟电路 (特别是接收前端) 与产生大量噪声的数字电路、开关电源模块进行分腔布局, 并采用高导磁率材料 (如坡莫合金) 或良导体 (如铜) 制成的屏蔽罩进行包裹, 以最大限度地抑制内部串扰和外部辐射干扰的侵入。其次, 在电源完整性方面, 必须在所有电源入口处部署π型或LC滤波器, 并在每个有源器件的电源引脚附近密集放置由不同容值 (如0.1μF和100pF) 电容组成的去耦网络, 用以滤除电源线上耦合的高频噪声, 为模拟电路提供一个“干

净”的能量来源^[4]。最后，科学的接地策略同样至关重要。应避免形成地环路，通常采用单点接地或混合接地的方式，将模拟地和数字地在物理上分开布局，并仅在系统的一个关键点（通常是ADC/DAC芯片下方）进行连接，以防止数字地电流污染敏感的模拟地平面。

3.2 自适应与鲁棒性设计

为了赋予系统更强的环境适应能力和长期运行的可靠性，自适应与鲁棒性设计理念必须贯穿于模拟电路的设计之中。例如，可以为LNA和PA引入自适应偏置电路，使其偏置电流能够根据实时的工作温度或输入/输出功率进行动态调整。这样不仅可以在保证性能的前提下优化静态功耗，还能有效补偿由工艺偏差、电源电压波动和温度变化（PVT）带来的性能漂移。在对抗多径衰落方面，利用MIMO或多天线分集接收技术是行之有效的方法，但这要求模拟前端能够支持多通道的同步、低噪声、高线性度工作，并严格保证各通道间良好的幅度和相位一致性。此外，考虑到地铁系统对安全性的极致要求，在关键的模拟电路（如PA）中集成实时的故障检测功能显得尤为重要。通过内置的功率、温度和驻波比（VSWR）传感器，系统可以持续监控PA的健康状态，一旦检测到异常（如天线开路或短路导致的VSWR恶化），便能立即触发保护机制，切换至冗余的备用通道或进入安全降级模式，从而防患于未然，确保通信链路的最高级别可用性。

4 结语

本文系统地研究了地铁无线通信系统中模拟信号处

理电路的关键技术与优化方法。研究表明，地铁独特的电磁环境对模拟前端的噪声、线性度、动态范围和可靠性提出了全方位的严苛要求。单纯依赖数字信号处理无法从根本上解决由模拟电路引入的噪声和失真问题。通过对LNA、混频器、AGC和PA等核心模块进行场景化、精细化的设计——包括采用先进的电路拓扑、新材料/新工艺、线性化技术以及智能控制算法——并辅以严格的EMC措施和系统级的鲁棒性设计，可以显著提升MWCS在复杂地铁环境下的整体性能和稳定性。未来的研究方向将聚焦于更高集成度的全CMOS射频SoC设计、面向毫米波频段的模拟电路、以及利用人工智能进行模拟电路参数的在线自优化等方面。随着5G-R（5G for Railways）等新一代铁路通信标准的推进，对高性能、高可靠模拟信号处理电路的需求将更加迫切，其研究价值也将愈发凸显。

参考文献

- [1]张梦妍,何超,王晓峰.地铁场景无线通信网络优化及难点思考[J].邮电设计技术,2025,(07):53-58.
- [2]邹晨磊.无线通信技术在地铁BAS系统中的应用[J].集成电路应用,2024,41(11):40-41.
- [3]李康.地铁车地无线通信信号传输抗干扰方法研究[J].交通世界,2024,(12):20-22.
- [4]梅子然.一种地铁车地无线通信系统网络方案的研究和优化[J].铁路工程技术与经济,2023,38(06):9-13.