

# 基于高速数模混合电路的地铁轨道无线通信系统设计

米良彬 潘小瑞

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 随着城市轨道交通网络的日益复杂化与智能化,对车-地(Train-to-Wayside)无线通信系统的可靠性、实时性与带宽提出了前所未有的严苛要求。传统的通信技术在应对地铁隧道内多径效应、高速移动多普勒频移以及高密度业务并发等挑战时,逐渐显现出性能瓶颈。本文提出并设计了一种基于高速数模混合集成电路(Mixed-Signal IC)的新型地铁轨道无线通信系统架构。该系统以5G NR(NewRadio)技术为物理层基础,深度融合了高速ADC/DAC、高性能锁相环(PLL)、数字预失真(DPD)及自适应均衡等关键数模混合电路模块。通过理论分析、系统建模与仿真验证,本文详细阐述了高速数模混合电路在提升系统抗干扰能力、降低端到端时延、增强信号完整性方面的核心作用,并针对地铁隧道这一特殊信道环境,设计了相应的自适应调制编码(AMC)与波束赋形策略。

**关键词:** 地铁通信; 高速数模混合电路; 5G NR; 车-地通信; 自适应均衡

## 引言

城市轨道交通是现代大都市公共交通的骨干,其安全高效运行关乎城市运转与居民生活质量。如今,随着全自动无人驾驶、基于通信的列车控制、乘客信息系统等应用的普及,地铁系统对无线通信网络依赖程度空前。这些新兴业务“两极分化”:CBTC等控制指令属超可靠低时延通信范畴,要求超高可靠性和极低时延;高清视频回传等业务则属增强型移动宽带范畴,需海量带宽支持。然而,地铁运行环境恶劣,列车在狭长封闭隧道高速行驶,无线信号传播面临严重多径衰落、显著多普勒效应和动态变化的信道特性三大挑战。传统技术难以兼顾URLLC与eMBB需求,5G NR技术虽提供新可能,但其高性能实现依赖底层硬件,尤其是高速、高精度的数模混合集成电路。所以,深入研究并设计面向地铁轨道通信的专用高速数模混合电路系统意义重大。

## 1 系统总体架构设计

本文提出的系统采用典型的基站(轨旁单元WU)与车载单元(OBU)的双向通信模式。系统架构可分为三层:应用层、协议层和物理层(PHY)。其中,物理层是本文研究的重点,其核心在于高速数模混合电路的实现。

### 1.1 物理层硬件平台

#### 1.1.1 射频收发前端

包含低噪声放大器(LNA)、功率放大器(PA)、混频器与滤波器。LNA需具备高增益、低噪声系数( $NF < 2\text{dB}$ )和良好线性度;PA需输出+30dBm功率以克服隧道损耗,但其非线性会引发频谱再生与邻道泄漏(ACLR),需依赖数字预失真(DPD)补偿;混频器与滤波器完成上下变频并抑制镜像与带外干扰。

#### 1.1.2 高速数据转换子系统

包括高速ADC与DAC。接收端ADC需支持 $> 2\text{GSPS}$ 采样率、 $\geq 12\text{-bit}$ 有效位(ENOB)及高SFDR,以准确捕获宽带信号(如5G毫米波);发射端DAC需高线性度与高采样率,确保I/Q信号转换后频谱纯净。

#### 1.1.3 时钟与同步子系统

所有高速数字电路的稳定运行都依赖于一个极其精确和稳定的时钟源。高性能锁相环(PLL)是该子系统的核心,它从一个低相位噪声的晶体振荡器(XO)或温度补偿晶体振荡器(TCXO)产生参考频率,并通过反馈环路生成系统所需的高频、低抖动时钟。在高速移动的地铁场景中,本地振荡器(LO)的相位噪声会与多普勒频移相互作用,加剧ICI<sup>[1]</sup>。因此,PLL必须具备超低的积分相位抖动(例如 $< 100\text{fsRMS}$ ),这对于保证OFDM符号的正交性和高阶调制(如256QAM)的解调性能至关重要。

#### 1.1.4 数字基带处理单元(BBU)

虽然严格意义上属于纯数字电路,但其与数模混合电路紧密耦合。FPGA/ASIC承担物理层的大部分计算密集型任务,包括信道编码/解码(LDPC/Polar码)、OFDM调制/解调、MIMO检测、信道估计以及本文重点讨论的数字预失真(DPD)和自适应均衡算法的执行。

## 1.2 关键数模混合电路的协同工作机制

整个物理层的工作流程体现了数模混合电路的深度协同:(1)下行链路(WU→OBU):BBU生成数字基带信号→高速DAC将其转换为模拟信号→模拟信号经上变频、PA放大后发射→OBU的LNA接收微弱信号→下变频至中频→高速ADC采样量化→数字信号送入OBU的BBU进行解调与解码。(2)上行链路(OBU→WU):过

程与下行链路对称。在这个过程中，DPD和自适应均衡是两个至关重要的闭环反馈机制，它们的存在使得系统能够动态适应非理想硬件和恶劣信道带来的损伤。

## 2 关键数模混合电路模块设计与分析

### 2.1 高速ADC/DAC的设计考量

对于地铁通信系统，ADC/DAC的选择直接影响系统的信噪比（SNR）和动态范围。根据香农定理，系统容量 $C = B \log_2(1 + \text{SNR})$ ，其中B为带宽。为了最大化C，必须保证ADC/DAC引入的噪声远低于信道热噪声。

#### 2.1.1 ADC设计

在接收端，输入信号功率动态范围极大。当列车靠近WU时，接收信号强；远离时，信号弱。因此，ADC需要配合可变增益放大器（VGA）使用，确保在任何情况下，输入信号都能充分利用ADC的满量程范围，从而最大化有效位数（ENOB）<sup>[2]</sup>。此外，ADC的孔径抖动会直接转化为采样时刻的不确定性，进而引起信噪比恶化，其影响在高频信号下尤为严重。公式表示为： $\text{SNR}_{\text{jitter}} \approx -20 \log(2\pi f_{\text{in}} * t_{\text{jitter}})$ ，其中 $f_{\text{in}}$ 为输入信号频率， $t_{\text{jitter}}$ 为均方根抖动。因此，选择低抖动的ADC和为其提供超低抖动的采样时钟（来自高性能PLL）是设计的关键。

#### 2.1.2 DAC设计

在发射端，DAC的非线性（如积分非线性INL、微分非线性DNL）和时钟馈通、毛刺等效应会污染发射频谱。这不仅会降低本信道的EVM（误差矢量幅度），还会对相邻信道造成干扰。高线性度的电流舵型DAC结构通常是首选。同时，DAC的重建滤波器设计也至关重要，用于平滑阶梯状的输出波形并抑制镜像频率。

### 2.2 高性能锁相环（PLL）设计

在5G NR的OFDM系统中，子载波间隔（SCS）可以配置为15kHz、30kHz、60kHz等。相位噪声会在频域上扩散，导致本振相位在时域上随机游走，破坏子载波间的正交性。相位噪声引起的EVM恶化可以近似表示为 $\text{EVM}_{\text{pn}} \approx \sqrt{(2 * L(f))}$ ，其中 $L(f)$ 是在特定偏移频率 $f$ 处的单边带相位噪声功率谱密度。对于256QAM（要求 $\text{EVM} < 3.5\%$ ），系统对相位噪声的要求极为苛刻。因此，PLL设计必须采用低噪声压控振荡器（VCO）、高增益低噪声的电荷泵以及精心设计的环路滤波器，在保证环路稳定性的前提下，最大限度地抑制带内和带外相位噪声。虽然PLL本身不直接补偿多普勒频移（这主要由基带的频率同步算法完成），但一个低相位噪声的本地振荡器可以为频率估计算法提供一个更“干净”的信号，从而提高估计精度和跟踪速度。

### 2.3 数字预失真（DPD）技术

DPD是解决PA非线性失真的最有效手段。其基本思

想是在PA的输入端，预先施加一个与PA非线性特性“相反”的失真，使得PA的非线性效应与预失真相互抵消，最终输出一个线性的、频谱干净的信号。DPD是一个闭环系统。BBU中的DPD模块生成预失真后的信号，经DAC、上变频、PA后发射。一部分发射信号通过耦合器被反馈回来，经LNA、下变频、ADC后，送回BBU。BBU中的自适应算法（如最小均方LMS或递归最小二乘RLS）利用反馈信号与原始期望信号之间的误差，不断更新DPD模型的系数。常用的PA行为模型包括记忆多项式（MP）模型和广义记忆多项式（GMP）模型。后者能更好地描述PA的动态非线性效应。DPD的实现复杂度与模型阶数和记忆深度成正比，需要在性能和资源消耗之间取得平衡。在FPGA上实现高效的DPD是本系统的一个关键技术挑战。

### 2.4 自适应均衡器设计

自适应均衡器位于接收链路的数字基带部分，用于对抗由多径信道引起的码间串扰（ISI）。鉴于地铁信道的频率选择性衰落特性，判决反馈均衡器（DFE）因其能有效抑制前导和拖尾ISI而被广泛采用。DFE由一个前馈滤波器（FFF）和一个反馈滤波器（FBF）组成。FFF用于均衡信道的前导部分，FBF则利用先前已正确判决的符号来消除由信道拖尾引起的ISI。LMS算法因其结构简单、计算量小而常用于DFE的系数更新<sup>[3]</sup>。但在高速移动场景下，信道变化迅速，LMS的收敛速度可能不足。此时，可以考虑采用收敛更快的RLS算法，或者结合信道估计信息的判决-directed（DD）模式。在5G NR系统中，通常利用导频（Pilot）或参考信号（DMRS）进行初始信道估计，然后在此基础上启动自适应均衡，可以大大加快收敛过程。

## 3 地铁隧道信道建模与自适应通信策略

### 3.1 地铁隧道信道模型

本文采用基于几何的随机信道模型（GSCM）来模拟地铁隧道环境。该模型将隧道视为一个矩形波导，主要考虑以下几类传播路径：

直射路径（LOS）：当WU与OBU天线可视时存在。

单次反射路径：信号经隧道一侧墙壁或天花板/地面一次反射后到达接收端。

多次反射路径：信号在隧道内经历两次或更多次反射。

信道冲激响应（CIR）可表示为：

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k(t) * \exp(-j2\pi f_d k(t)t) * \delta(\tau - \tau_k(t))$$

其中，K为多径分量总数， $\alpha_k(t)$ 为第k条路径的复增益， $f_d k(t)$ 为对应的多普勒频移， $\tau_k(t)$ 为时延。由于列车

高速移动,  $f_{d,k}(t) = (v/\lambda) * \cos(\theta_k(t))$ , 其中 $v$ 为车速,  $\lambda$ 为波长,  $\theta_k(t)$ 为第 $k$ 条路径与列车运动方向的夹角, 该角度随时间动态变化。

### 3.2 自适应调制与编码 (AMC)

AMC是物理层链路自适应的核心技术。系统根据实时估计的信道质量指示 (CQI), 动态选择最优的调制阶数 (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM) 和编码速率。OBU通过测量接收到的参考信号的SINR (信号与干扰加噪声比), 并结合自身的均衡器性能 (如EVM), 生成CQI报告, 并通过上行链路反馈给WU。WU的调度器根据CQI, 查询预定义的CQI-调制编码方案 (MCS) 映射表, 为下一传输时间间隔 (TTI) 选择合适的MCS<sup>[4]</sup>。在地铁场景下, 由于信道相干时间短 ( $T_{coh} \approx 1/(4f_{d,max})$ ), AMC的更新周期必须足够快, 以跟上信道的变化。高速数模混合电路提供的精确信道测量能力是实现快速、准确AMC的前提。

### 3.3 波束赋形策略

为了对抗路径损耗和多径衰落, 系统采用基于大规模MIMO的波束赋形技术。轨旁单元 (WU) 可沿隧道方向部署线性天线阵列。通过调整各天线单元的相位和幅度权重, 可以形成指向特定列车的窄波束, 从而集中发射能量, 提升接收信噪比, 并减少对其他列车的干扰。车载单元 (OBU) 同样可以装备小型天线阵列。在高速移动过程中, OBU需要快速进行波束扫描和跟踪, 以维持与WU的最佳链路。这需要高效的波束管理算法和低时延的

控制信令交互。高速ADC/DAC和低抖动时钟确保了波束赋形权值计算的精度和波束切换的敏捷性。

## 4 结语

本文聚焦未来智慧地铁对无线通信系统的高要求, 创新性地提出并设计了基于高速数模混合电路的新型地铁轨道无线通信系统。该系统深度融合5G NR技术与高速ADC/DAC、高性能PLL、DPD、自适应均衡等先进数模混合电路模块, 成功应对地铁隧道内高速移动、多径衰落及硬件非理想性等难题。展望未来, 研究工作将朝多方向推进。芯片级集成方面, 探索把关键数模混合电路模块集成到单颗SoC中, 降低成本、功耗与体积; AI驱动的智能优化上, 借助机器学习算法对DPD模型等在线学习预测, 提升自适应性能; 太赫兹通信探索中, 面向6G愿景, 研究太赫兹频段在地铁场景的信道特性及超高速数模混合电路实现方案。

## 参考文献

- [1]王婷钰.基于数模混合型采样失调校准的模拟前端电路[D].西安电子科技大学,2024.
- [2]杨忙,薛文龙.高速折叠内插ADC数模混合电路信号增强系统[J].电子制作,2024,32(07):97-100.
- [3]李娜,李莉.基于FMEA分析的数模混合电路多道脉冲幅度控制算法[J].电子设计工程,2022,30(20):176-179+184.
- [4]冯柏军.小规模数模混合电路CP测试数据分析方法[J].产品可靠性报告,2024,(12):76-78.