

DRTD光纤直放站近端机有源合路模块的关键技术研究与应用

梁程瑞

通号通信信息集团上海有限公司 上海 202403

摘要:在现代铁路通信快速发展的进程中, DRTD光纤直放站近端机有源合路模块的应用成为保障通信质量的关键因素。本文以铁路通信应用需求为导向, 系统地对有源合路模块开展深入研究。先是详细解析模块核心架构设计, 包括单片机控制单元如何协同各电路模块运作, 以及关键器件选型与集成要点; 接着深入探讨多频段信号合路等核心技术, 分析其实现路径与技术难点攻克方法; 再针对技术优化方向, 提出智能化控制升级、绿色节能设计等创新策略。经研究发现, 通过对模块架构的合理规划、关键技术的创新应用以及前瞻性的技术优化, 能够显著提升模块信号处理精度与系统稳定性, 有效满足铁路通信场景复杂多变的需求, 为有源合路模块在通信领域的进一步推广与深化应用提供坚实的理论与实践支撑。

关键词: DRTD光纤直放站; 有源合路模块; 信号处理技术; 智能化控制; 多频段合路

引言

随着我国高速铁路发展的不断壮大, 信息化程度不断提高, 国家对无线电频率重新做了规划和调整, 铁路450MHz模拟列调频点将被收回, 400MHz数字通信设备在普速支线、货运专线等场景具有成本优势, 将承担450MHz升级任务, 铁路无线列调系统将由原来的模拟通信制式转变为数字通信制式。铁路400MHz数字无线列车调度通信系统(DRTD)是下一代铁路列调的重要通信系统, 不仅能满足铁路的调度通信业务、无线车次号校核信息传送、运维业务等多种需求, 并且具有更少的占用频率资源、更高的接收灵敏度、更低的杂散发射、更好的抗干扰能力、更灵活的系统结构等优势。

光纤直放站是铁路DRTD通信系统的重要组成部分, 承担着固定电台信号延伸覆盖的重要任务。在DRTD系统中的光纤直放站与其他系统使用的光纤直放站在原理上基本相同, 均使用光纤作为传输媒介, 采用直接耦合方式从固定电台提取信号, 然后将固定电台信号通过光纤传送到如铁路线路上的隧道、丘陵、沟壑等需要信号覆盖的弱场区, 使用天线或者漏缆进行信号覆盖。DRTD光纤直放站近端机有源合路模块承担着多路上行信号合路处理、信号放大、功率调控、监控处理等核心功能^[1]。在铁路通信场景中, 面临着信号质量要求高、环境干扰复杂、设备安装难度大等实际问题, 传统的有源合路模块已难以满足多样化的应用需求。尽管目前行业内对该模块已有一定研究, 但在智能化自适应调节、多频段信号处理等方面仍存在技术瓶颈。基于此, 本文立足铁路通

信工作实际, 深入研究有源合路模块的关键技术, 探索技术优化路径, 力求为提升通信网络性能、降低运维成本提供切实可行的解决方案。

1 有源合路模块的原理与硬件设计

1.1 模块核心架构设计

DRTD光纤直放站有源合路模块以单片机作为核心控制单元, 搭建起一套功能完备的架构体系。上行通信接口承担着模块与外部系统的数据交互任务, 确保指令传输、状态反馈等信息高效流通, 让模块能精准响应外部控制需求。直流稳压电源模块为各电路单元输送稳定电能, 有效规避电压波动对信号处理产生的不良影响, 保障模块运行基础稳定^[2]。ALC自动电平控制电路作为功率调控关键环节, 依据信号状态动态调整输出功率, 维持信号传输质量。光模块告警信号判别及射频开关切换电路, 实时监测光模块工作状态, 一旦出现异常及时切换射频通路, 保障信号传输链路的连续性与可靠性, 各部分协同构建起模块稳定运行的架构基础。模块核心硬件设计示意图如图1所示。

1.2 信号处理流程

多路上行射频输入信号区分主备通路, 首先同时进入射频开关, 通过单片机来切换选择, 实现输入信号的冗余备份。然后再进入数字衰减器, 基于实际需求对信号增益与衰减进行精准调节, 为后续合路处理提供适配信号。调节后的信号输送至无源射频合路器完成合路, 汇聚多路信号。合路信号进入ALC自动电平控制电路, 依次经过PIN衰减器初步调控功率、第一射频放大管增强

信号强度，再由第一电桥分配信号，送入并联的400MHz与450MHz滤波器，滤除杂波干扰；滤波后信号经第二电桥、第二及第三射频放大管进一步处理后输出信号，第三射频放大管输出端的耦合器和功率检测芯片，将射频信号采样为电压模拟量信号，与参考电平对比，差值反

馈至 PIN 衰减器，动态调整输出功率，形成闭环控制，使得射频输出功率保持恒定。通过调节参考电平的大小，来控制最大输出功率的大小，从而实现ALC自动电平控制功能，以适配不同传输场景需求。ALC自动电平控制电路示意图如图2所示。

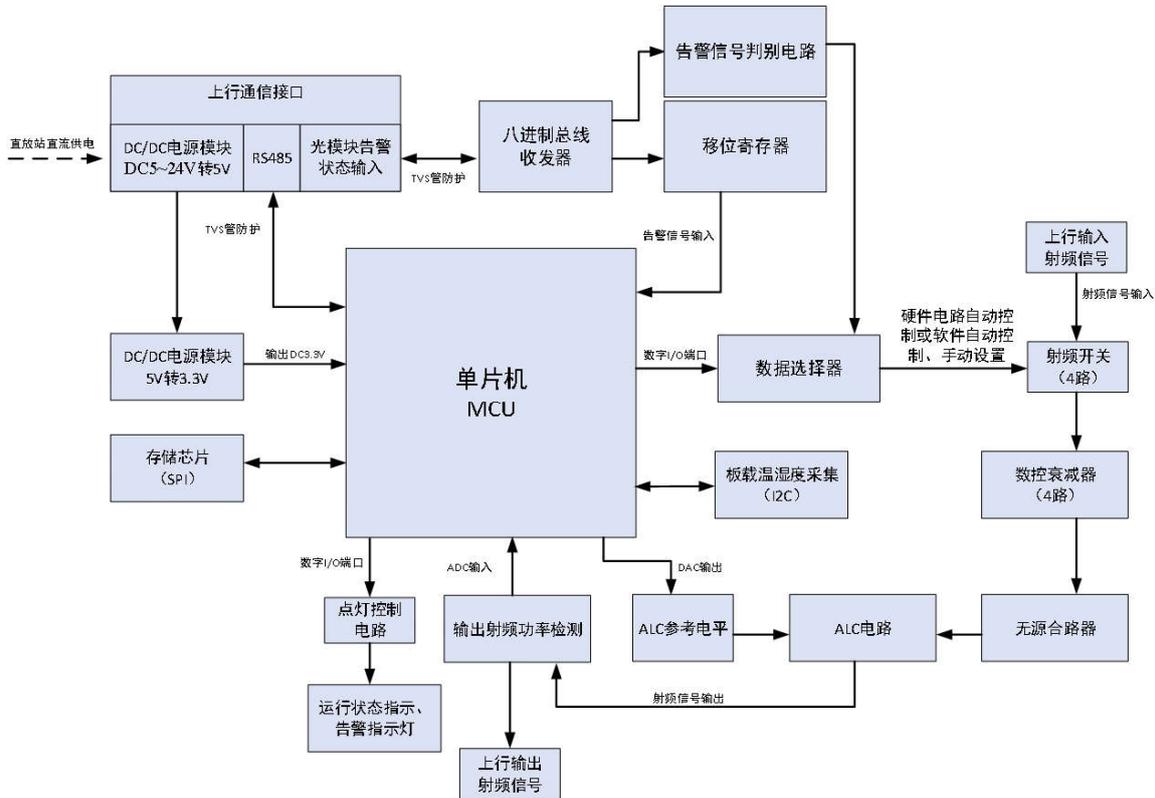


图1 模块核心硬件设计示意图

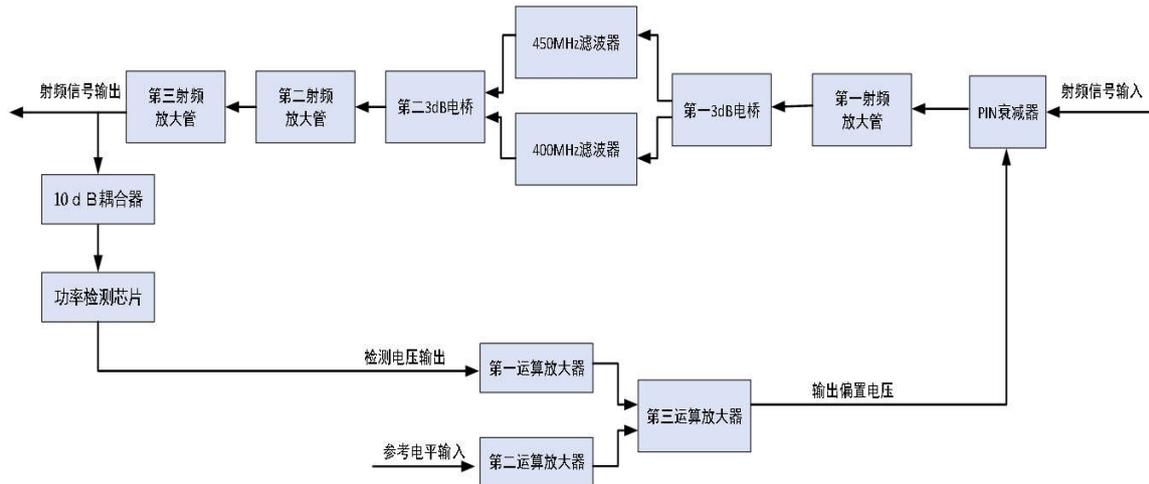


图2 ALC自动电平控制电路示意图

1.3 关键器件选型与集成

关键器件选型需综合考量性能、适配性等多维度因素。射频数字衰减芯片要具备高精度增益与衰减调节能

力，面对多路上行输入射频信号，可精准调节信号强度，适配不同场景下的信号处理需求。射频放大管、功率检测芯片均需兼顾良好线性度与宽频特性，在较宽频

段内稳定工作。射频开关、无源合路器、3dB电桥要具备较低的插入损耗性能，确保衰减的一致性，保障信号强度可控。ALC电路里的PIN衰减器、射频放大管，依据信号功率等级、频段范围严格筛选，确保信号放大、衰减值过程稳定可控，避免信号失真。集成时，优化电路板布局，合理规划器件间距与走线，降低信号串扰风险，通过阻抗控制技术确保信号匹配和完整性。使关键器件在模块架构中高效协同，提升模块整体性能表现。

1.4 模块硬件测试与性能验证

硬件测试从功能与性能两大维度开展。功能测试聚焦各电路单元工作状态，验证上行通信接口数据传输的准确性，检测光模块告警信号判别是否灵敏、射频开关切换是否及时，确保模块基础功能正常运作。性能测试围绕信号处理能力展开，测量不同输入信号下增益调节范围与衰减精度，评估ALC电路对输出功率的调控效果，验证400MHz和450MHz频段滤波后信号的通带特性，对比设计指标与测试结果，判断模块硬件设计是否合理。通过多轮测试、数据分析，为模块优化升级提供依据，保障其在实际应用场景中稳定可靠、高效运行，满足通信系统对信号合路处理的需求^[3]。

2 有源合路模块关键技术研究

2.1 多频段信号合路技术

为了满足450MHz模拟设备转为400MHz数字设备升级迭代期间，信号稳定可靠传输的要求，DRTD光纤直放站有源合路模块进行了两种频段的兼容性合路设计。不同频段其属性与功率特征有所差异，若合路处理不当，极易引发信号串扰、失配、功率损耗过大等问题。同时，模块又需要在多频段情况下满足良好的通带特性，为此，多频段信号合路处理技术需要围绕信号的合路、功分、滤波、合路、放大五大核心环节深入展开。首先基于无源合路器构建核心合路通路，将多路上行信号合路汇聚，方便后续处理，这里需要深度考量信号分配的均匀性、插损及信号串扰等问题。所以，信号合路前需先经过数字衰减器对各路信号开展预处理，依据不同信号的初始状态，精准调节每一通路的增益与衰减参数，促使信号在合路前达到功率、相位的适配状态，从根本上规避合路时信号失配的问题。经过无源合路器合路后的信号通过3dB电桥分别输入400MHz与450MHz滤波器，能够在各自频段进行针对性滤波操作，精准去除带外杂波，确保进入后续环节的信号纯净度^[4]。两个频段的滤波器均具备了较好的滤波特性，满足指标-3dB带宽 $> f_0 \pm 1\text{MHz}$ 、-40dB带宽 $< f_0 \pm 5\text{MHz}$ 的要求。同时，又要保证两个频段信号在处理时不会发生互相串扰问题，模

块内部使用腔体结构，如图3所示，将不同频段、功能的电路进行分区屏蔽，对电路布局也进行分区域布置，保证有效间隔，防止信号串扰。滤波完成后又通过3dB电桥进行合路，合路前在两个通路上均放置一个II型衰减电路，目的是调节因频率差异出现的插损不平衡问题。在宽频范围内，通过优化射频放大管的电路参数、选用线性度优良的放大器件，保障信号经过放大后，不会因频率差异出现增益不平衡、信号失真等问题。通过上述协同优化设计，有力保障了信号合路后的功率谱密度，将信号衰减和损耗控制在较低水平，满足后续ALC电平控制等环节对优质信号的需求。从而实现多频段信号高效稳定合路，让模块有效适配设备升级迭代场景下的传输需求。

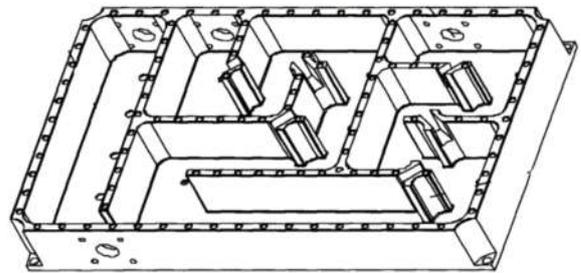


图3 模块内部屏蔽腔体示意图

2.2 线性化与失真补偿技术

信号在合路、放大等处理环节中，受器件非线性特性影响，极易产生失真现象，进而降低信号传输质量，线性化与失真补偿技术成为保障信号质量的关键。ALC自动电平控制电路中的PIN衰减器、射频放大管，通过精准调控工作参数，抑制器件非线性引发的信号失真问题。在此基础上，构建完善的反馈补偿机制，利用耦合器提取输出端信号，将其转换为电压模拟量后，与预先设定的参考电平进行对比，生成的误差信号实时反馈至前端衰减器，动态调整器件工作状态。这种闭环补偿方式，能够实时捕捉并修正信号失真问题，使经过模块处理的信号，在幅度、相位等关键特征上始终保持线性，切实满足通信系统对信号高质量传输的要求，为通信链路的稳定可靠运行提供保障。

2.3 模块集成与小型化技术

铁路通信设备部署场景中，对模块集成度与小型化有着现实且迫切的需求，这与电路布局、器件选型有着密切关系。电路设计环节，采用高密度布线工艺，并将单片机、通信接口、电源模块等核心电路单元，以紧凑且合理的布局方式集成，在保障各单元电气连接稳定可靠的前提下，大幅缩减电路板物理尺寸，对其空间进行极致压缩。器件选型阶段，优先考量小型化、高集成度

的器件,如选用贴片式封装的射频芯片、衰减器、滤波器等,借助先进封装技术,减少器件物理体积占用。同时,通过结构设计优化,合理规划模块内部空间,在有限的空间内,完整集成各项功能。从而满足铁路通信设备对安装尺寸、便携性的实际需求,助力模块在基站建设、信号补盲等铁路通信场景中实现便捷部署与高效应用。

3 有源合路模块的技术优化与发展趋势

3.1 智能化控制技术升级

DRTD光纤直放站有源合路模块的智能化控制技术升级,聚焦于实现信道状态预测和参数自适应调整的能力。未来通信环境中,信号特征随场景动态变化,传统控制模式难以实时精准响应。模块可引入机器学习算法,通过对历史信号数据、环境参数的采样,构建信号特征识别模型。当多路上行射频信号输入时,可快速判别信号频段、功率波动趋势,自动调整数字衰减器增益、ALC电路参数等。例如,在复杂铁路枢纽场景,大量移动终端并发通信,信号功率、频段随机变化,智能化模块可依据实时采集的信号数据,动态优化合路策略,保障信号稳定输出,减少人工干预成本,提升模块在复杂场景下的适配性与可靠性。

3.2 绿色节能设计

铁路通信设备部署注重能耗控制,有源合路模块的绿色节能设计尤为关键。从硬件角度,选用低功耗器件,如新型低功耗射频放大管,在保障信号放大性能前提下,降低静态工作电流。同时,优化电源管理模块,采用高效DC-DC转换电路,提升电能转换效率,减少能量损耗。软件设计引入休眠机制,当模块检测到上行信号功率低于阈值,或处于非高峰通信时段,自动关闭部分非关键电路,如将闲置射频通道、辅助检测电路置于低功耗模式。通过这些设计,在满足通信信号处理需求时,降低模块整体功耗,契合铁路通信网络绿色节能建设要求。

3.3 行业标准与未来发展方向

当前DRTD光纤直放站有源合路模块应用渐广,行业

标准需同步完善。标准制定应涵盖模块所实现功能和性能指标。功能方面,如实时监测光模块工作状态及告警功能;性能方面如信号合路损耗、不同频段信号处理失真度、ALC控制精度等,明确模块在不同通信场景的准入要求。未来随着前沿技术研究推进,模块可与边缘计算融合,实现信号质量本地分析及故障诊断,减少云端依赖。推动有源合路模块从单一信号处理向智能通信节点演进,助力通信基础设施升级。

结论

本研究围绕DRTD光纤直放站近端机有源合路模块展开了全面且深入的探讨,从硬件设计基础到关键技术突破,再到未来技术优化与发展趋势的研判,形成了一套完整的研究体系。在硬件设计层面,通过合理规划模块核心架构与精准选型器件,保障了模块的基础性能与稳定性;在关键技术研究,多频段信号合路等技术的创新应用,显著提升了模块对复杂信号的处理能力;而智能化控制、绿色节能设计等技术优化方向的探索,则为模块适应通信技术的快速发展指明了道路。研究成果不仅在理论上丰富了有源合路模块的技术内涵,更在实践中为铁路通信网络建设与优化提供了有效技术方案。后续将持续关注通信技术前沿动态,进一步深化对有源合路模块的研究,不断推动其技术革新,使其更好地服务于通信行业的高质量发展。

参考文献

- [1]黎志刚,谢卓鑫,李晓晖,等.应用于光纤激光系统的高增益高稳定性光纤放大器研究[J].光通信技术,2025,49(03):102-107.
- [2]向志华.GSM-R光纤直放站应用简要分析[J].铁道工程学报,2007,24(2):78-83.
- [3]来焯欣.CDMA系统中射频器件性能测试方法的研究:HSPA+信号产生与分析[D].陕西:西安电子科技大学,2019:84-87.
- [4]潘宁,叶强,陈其豪.基于公共腔的新型同轴腔体双频合路器研制[J].电子元件与材料.2014,(9):99-107.