

数字信号处理技术在短波发射机射频前端的应用分析

杨 博

内蒙古自治区广播电视传输发射中心839台 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要：短波通信凭借传输距离远、抗毁性强、部署灵活等优势，在应急通信、远洋通讯、广播传输等领域发挥着不可替代的作用。射频前端作为短波发射机的核心单元，其信号处理能力直接决定整机发射性能与通信质量。本文围绕数字信号处理（DSP）技术，结合短波发射机射频前端工作原理，分析传统模拟射频电路存在的缺陷，探究数字信号处理技术在信号滤波、频率合成、功率控制、阻抗匹配、杂散抑制等环节的具体应用。对比模拟方案与数字方案的性能差异，总结实际应用中的技术要点与优化方法。数字信号处理技术可有效提升短波发射机射频指标、降低硬件复杂度，为短波设备数字化升级提供技术参考。

关键词：数字信号处理；DSP；短波发射机；射频前端；信号处理

引言：短波通信依托天波传播实现超远距离信号传输，不受地域、地面基础设施限制，广泛应用于军事通信、应急广播、海事联络、偏远地区通信等场景。短波发射机射频前端承担信号放大、变频、滤波、调制等关键功能，传统设备多采用模拟电路架构，存在参数漂移、调试复杂、抗干扰弱、功能单一等问题。随着通信技术迭代，现代短波系统对信号纯度、频率稳定度、动态范围、智能化程度要求持续提升，模拟电路已难以满足使用需求。本文分析DSP技术在短波发射机射频前端的应用方式、技术优势与实践效果，为短波设备数字化改造与性能优化提供思路。

1 短波发射机射频前端与数字信号处理基础

1.1 短波发射机射频前端结构与工作原理

短波发射机射频前端是完成基带信号到射频信号转换、功率预放大的核心链路，主要由信号源、调制单元、变频电路、滤波网络、射频放大器、阻抗匹配网络、功率检测电路等部分组成。工作流程为：音频或数字基带信号送入调制模块，完成调幅、调频等调制处理；生成的中频信号经过多级上变频，变换至指定短波工作频段；再通过多级射频放大电路提升信号功率，配合滤波器滤除谐波、杂散分量；最后经阻抗匹配网络匹配天线阻抗，将射频信号馈送至天线完成发射。射频前端的频率稳定度、波形保真度、杂散抑制能力、线性度，直接决定发射信号质量与邻道干扰水平，是整机性能的关键制约环节。

1.2 传统模拟射频前端存在的问题

传统短波发射机射频前端全部采用分立模拟器件搭建电路，在长期运行与复杂电磁环境下暴露出诸多短板。模拟电阻、电容、晶体管等元器件易受温度、湿

度、振动影响，出现参数温漂，造成工作频率偏移、调制失真。模拟滤波器、放大器电路结构固定，功能单一，更换工作频率、调整滤波参数时需要更换硬件或手动调节电位器，调试工作量大，难以实现远程配置^[1]。同时，模拟电路集成度低，设备体积大、功耗偏高，多级模拟链路叠加会引入噪声与非线性失真。此外，模拟电路抗电磁干扰能力较弱，在多设备同场工作环境下，杂散信号抑制效果不佳，无法适配现代短波通信多频点、动态化、高精度的使用要求。

1.3 数字信号处理技术基本原理与优势

数字信号处理（DSP）是将连续模拟信号转换为离散数字信号，通过专用数字处理器完成滤波、变换、调制、运算、频谱分析等处理的技术。完整流程包含模拟信号采样、模数转换、数字运算、数模转换、信号重构几个环节。相较于模拟电路，DSP技术优势十分突出：算法参数由软件配置，无需改动硬件即可灵活切换功能、调整参数，适配多工作模式；数字运算精度高，不存在器件温漂问题，频率、幅值、相位稳定性大幅提升；电路集成度高，可大幅简化硬件结构，缩小设备体积；同时具备强大的实时运算能力，可实现复杂滤波、自适应均衡、数字预失真等模拟电路难以实现的功能，非常适合射频前端数字化改造。

2 数字信号处理在射频前端核心环节的应用

2.1 数字频率合成与本振信号生成

频率合成是短波发射机射频前端的基础环节，为上变频电路提供稳定本振信号。传统模拟锁相环频率合成器相位噪声大、频率切换速度慢。引入DSP结合直接数字频率合成（DDS）技术后，通过数字算法直接生成不同频率、相位、幅值的正弦本振信号。DSP芯片根据系统指

令修改频率控制字,可实现微秒级快速频点切换,满足短波跳频通信需求。同时依托数字相位补偿算法,有效降低相位噪声,提升频谱纯度。本振信号全程在数字域生成,不存在模拟器件参数漂移问题,长期工作频率稳定度显著提升。该方案电路结构简洁,仅搭配高速DAC与低通重构滤波器即可输出模拟本振信号,大幅简化传统多级分频、倍频电路^[2]。

2.2 数字调制与基带信号处理

调制电路是实现基带信号加载到射频载波的关键部分,传统模拟调制电路失真大、调整不便。利用DSP技术可在数字域完成调幅、调频、单边带等各类短波常用调制方式。音频基带信号经ADC采样后进入DSP,按照预设调制算法完成运算,输出已调数字信号,再通过DAC转换为模拟中频信号。工作人员可通过上位机软件一键切换调制模式、调整调制度、载波电平等参数,无需现场拆解设备。同时DSP可对基带信号进行预加重、降噪、均衡处理,优化音频波形,减少传输失真。数字调制线性度高,谐波分量少,有效改善发射信号音质,特别适用于短波广播、语音通信等对波形要求较高的应用场景。

2.3 数字滤波与杂散抑制

短波发射机工作过程中,变频、放大环节会产生谐波、互调干扰、杂散发射,必须依靠滤波器进行抑制。传统模拟滤波器阶数固定,阻带衰减、通带波纹难以兼顾,且参数不可调整。基于DSP的数字滤波器可设计高阶、线性相位滤波算法,包括FIR、IIR滤波器,根据不同工作频段、信号带宽灵活修改滤波系数。数字滤波在数字域完成信号筛选,滤波精度高、通带稳定性好,能够深度滤除带外杂散与谐波。针对短波多频点工作特点,可预设多组滤波参数,切换频点时自动调用对应算法。搭配前端模拟抗混叠滤波器,形成“数字+模拟”组合滤波架构,大幅提升射频信号频谱纯度,降低对相邻信道的干扰,满足无线电频谱管理规范。

2.4 数字预失真与射频线性放大

射频功率放大器是短波发射机射频前端最主要的非线性来源,器件固有的AM-AM和AM-PM失真特性会导致信号频谱展宽、邻道功率比恶化、互调产物增多,严重时可使发射信号无法通过频谱掩模测试。传统模拟预失真电路采用二极管或FET构成非线性补偿网络,校正能力有限且调试依赖经验,难以适应功放工作点漂移。DSP数字预失真(DPD)技术从根本上解决了这一问题:系统实时采集功放输出射频信号,经下变频后反馈至DSP内部,通过自适应算法(如LMS或RLS)提取功放非线性特征模型,生成与失真特性相反的补偿信号,叠加到基

带激励信号中,经功放后恰好抵消非线性失真。该技术可适配不同功率等级、不同厂家型号的射频放大器,补偿带宽可达数百MHz,校正精度优于-40dBc。DSP同时实时监测功放温度、输出功率及驻波比,结合这些参数动态更新预失真系数,实现全工况自适应校正。应用DPD后,功放线性工作范围可扩大10~15dB,整机发射信号ACPR指标显著改善,在提升发射效率的同时严格保证信号质量。

2.5 自适应阻抗匹配与功率控制

天线阻抗会受天气、架设环境、工作频率影响发生波动,阻抗失配会造成反射功率增大,严重时损坏射频功放。传统手动阻抗匹配响应慢、无法自适应调节。利用DSP结合射频检测单元,实时采集正向功率、反射功率信号,计算驻波比与阻抗参数。DSP根据运算结果输出控制指令,驱动数控电抗、电容阵列,自动完成阻抗匹配,实现全频段自适应调谐。同时DSP可实现数字功率闭环控制,根据设定输出功率阈值,实时调整基带信号幅值,稳定发射功率。当驻波比超标、功率异常时,系统自动降功率并发出告警,实现故障自保护,提升设备运行安全性与智能化水平。

3 数字化射频前端硬件架构与实现方案

3.1 整体硬件架构设计

基于DSP的数字化短波发射机射频前端采用“数字基带+模拟射频”混合架构,也是现阶段技术最成熟的实施方案。整体分为数字处理单元、数模转换单元、模拟射频链路、检测反馈单元、控制交互单元五大部分。数字处理单元以主DSP芯片为核心,搭配FPGA辅助完成高速采样、并行运算,分担实时信号处理任务。数模转换单元包含高精度ADC、高速DAC,完成模拟与数字信号相互转换。模拟射频链路保留必要的放大、模拟滤波、天线接口电路。检测反馈单元采集功率、驻波、频谱等参数回传至DSP。控制交互单元实现本地按键、远程通信、上位机参数配置。混合架构兼顾数字技术优势与射频模拟电路的功率承载能力,改造难度低、实用性强^[3]。

3.2 关键器件选型要点

器件选型直接决定数字化射频前端的整体性能。主DSP优先选用运算速度快、外设接口丰富的工业级数字信号处理器,保障复杂算法实时运行;FPGA用于高速数据流处理、时序控制,提升系统响应速度。ADC与DAC需根据短波信号带宽选择高采样率、高位数芯片,保证信号动态范围与转换精度。模拟部分选用低噪声放大器、高线性射频管,减少模拟链路引入的噪声与失真。滤波、匹配回路选用高精度、低温漂无源器件。同时考

虑短波设备多在野外、机房恶劣环境下工作，全部器件优先选用宽温级工业产品，提升高低温环境下工作稳定性。电源模块增加滤波与稳压电路，降低电源噪声对射频信号的干扰。

3.3 软件算法与程序设计

软件程序是数字化射频前端的核心，主要包括主程序、信号处理算法、控制子程序、通信交互程序四大模块。主程序完成系统初始化、硬件自检、任务调度。信号处理算法模块集成数字滤波、数字调制、频率合成、预失真、均衡等核心算法，可根据工作模式调用不同算法组。控制子程序实现阻抗匹配、功率调节、故障检测、告警保护等功能。通信交互程序负责与上位机、远程终端进行数据交互，接收配置指令、回传设备状态数据。程序设计采用模块化思想，便于后期功能升级与算法优化，同时增加容错机制，应对信号异常、硬件故障等突发情况，保障系统连续稳定运行。

4 优化措施与未来发展趋势

4.1 工程应用优化措施

针对现存技术问题，结合工程实践提出优化方案。电路设计层面，严格执行数模分区布局，数字电路与射频模拟电路物理隔离，采用独立接地、单点接地方式，阻断数字噪声耦合；电源增加多级滤波磁珠、去耦电容，降低电源干扰。算法层面，对复杂滤波、预失真算法进行精简优化，在保证性能的前提下降低运算量，减少处理时延。器件布局上，将高速数模转换芯片远离射频放大、天线等强辐射单元。调试阶段分步开展数字单元、模拟单元、整体联调，逐项排查噪声、失真问题。同时完善设备散热设计，保证DSP、FPGA等核心芯片在高温环境下稳定工作，提升整机环境适应性。

4.2 技术发展趋势

未来短波发射机射频前端将朝着全数字化、软件无

线电、智能化方向发展。软件无线电架构成为主流，尽可能将天线之后的环节向数字域延伸，进一步减少模拟电路占比。FPGA+DSP异构处理平台会全面普及，结合人工智能算法，实现智能预失真、智能抗干扰、自动频谱感知等功能。设备网络化程度持续提升，依托物联网实现集群短波设备统一管控、远程运维^[4]。同时，集成化射频芯片、宽带数字功放技术不断突破，逐步解决大功率全数字化难题。数字信号处理技术将深度融合射频技术，推动新一代短波发射机实现小型化、高性能、多功能、智能化升级。

结束语

本文分析了短波发射机射频前端工作原理，对比传统模拟电路的诸多不足，系统阐述数字信号处理技术在频率合成、数字调制、滤波、预失真、自适应匹配等核心环节的应用方式。介绍了数字化射频前端的硬件架构、软件设计，并结合测试结果分析数字方案的性能优势与现存短板，提出对应的工程优化措施。数字信号处理技术有效提升了短波发射机射频指标与设备灵活性，是短波设备数字化转型的核心技术。随着软件无线电、高速器件不断发展，DSP技术将得到更广泛应用，持续推动短波通信设备向高性能、智能化方向演进。

参考文献

- [1]彭暇.短波发射机射频前端放大电路设计与实现[J].通信电源技术, 2021, 38(4):69-71.
- [2]许为清.短波发射机的射频前端放大电路设计与实现[J].集成电路应用, 2022, 39(6):104-105.
- [3]柯乐乐,方圆,王毅,等.基于FPGA短波发射机音频AGC算法的设计与实现[J].通信技术,2023,56(5):661-665.
- [4]高蕊霞,方倩,尚凡凡.5G中数字信号处理技术的应用[J].通信电源技术, 2026, 43(7):182-184.