

微波信号数字化采集与处理系统设计

刘福教

锡林郭勒盟微波总站 内蒙古 锡林郭勒盟 026000

摘要: 针对高频微波信号采集易出现混叠失真、噪声干扰、时序紊乱等问题, 本文设计一款微波信号数字化采集与处理系统。系统以FPGA为主控核心, 搭建信号预处理、高速数据采集、存储传输硬件电路, 结合FIR滤波、FFT频谱分析及失真校正算法, 实现微波信号的高精度数字化采集与提纯处理。经软硬件调试与性能测试, 系统精度、稳定性与实时性达标, 可满足复杂工况下微波信号采集处理的应用需求。

关键词: 微波信号; 数字化采集与处理; 系统设计

引言: 微波信号凭借高频特性广泛应用于通信、探测等领域, 但其传输易受噪声干扰, 高速数字化采集存在频谱混叠、信号失真等技术难题, 传统采集系统精度低、抗干扰能力弱, 难以适配高频微波信号处理需求。为解决上述问题, 本文结合采样定理与数字信号处理理论, 设计软硬件一体化的微波信号数字化采集处理系统, 优化硬件电路与核心算法, 提升信号采集精度与系统稳定性, 为微波信号精准检测分析提供技术支撑。

1 微波信号数字化采集与处理系统总体方案与核心理论基础

1.1 微波信号特性分析

(1) 微波信号基本参数。微波信号具备高频、短波长特性, 其频率、波长直接决定信号传输特性, 带宽界定信号有效频率覆盖范围, 幅值反映信号能量强度。信号在空间与介质传输过程中, 会因介质损耗、空间散射产生规律性衰减, 衰减程度与传输距离、信号频率密切相关, 是系统信号预处理设计的核心依据。(2) 微波信号噪声与干扰特性。系统工作中主要存在三类干扰, 热噪声由器件内部电子热运动产生, 属于固有随机噪声; 电磁干扰来自周边电子设备的电磁辐射, 会叠加在有效信号上; 杂散信号干扰由信道串扰、谐波失真引发, 易造成信号频谱混杂, 三类干扰均会大幅降低采集信号的纯净度与精度^[1]。(3) 高速微波信号数字化难点。高频微波信号采样易出现频谱混叠问题, 导致信号信息丢失; 高速采样过程中器件非线性特性会引发信号失真; 多模块协同工作时, 时钟偏差易造成时序同步紊乱, 极大提升了高精度数字化采集的技术难度。

1.2 数字化采集与处理核心理论

(1) 信号采样定理。奈奎斯特采样定理要求采样频率大于信号最高频率两倍, 规避低频信号混叠; 带通采样定理适配高频微波窄带信号, 可在降低采样速率的同时, 完

整保留高频信号特征, 有效匹配微波信号高频采集需求。

(2) 信号量化与编码理论。ADC量化过程会产生固有量化误差, 量化位数直接决定误差大小; 不同编码方式的容错性、适配性存在差异, 合理的编码模式可减少数据传输损耗, 提升整体采集精度。(3) 数字滤波与信号处理基础理论。FIR、IIR滤波是核心降噪算法, 可针对性滤除各类噪声干扰; 配合频谱分析、信号重构算法, 可完成微波信号提纯、特征提取, 实现信号精准处理。

1.3 系统总体架构设计

(1) 系统设计原则。遵循小型化、高精度、高实时性、抗干扰、可拓展原则, 兼顾设备便携性、采集精准度与运行稳定性, 同时预留功能拓展空间, 适配多场景采集需求。(2) 整体硬件架构。系统分为四大核心单元, 微波预处理模块完成信号放大、滤波; 数据采集模块实现高速模数转换; 主控处理模块负责数据运算与算法处理; 存储与传输模块完成数据留存与实时上传。(3) 系统工作流程。完整链路为天线接收微波信号, 经预处理模块优化信号质量, 通过ADC完成模数转换, 由主控模块进行数字滤波、频谱分析等处理, 最终将有效数据存储并对外输出, 实现信号全流程数字化处理。

2 微波信号数字化采集与处理系统硬件电路设计

2.1 微波信号预处理模块设计

(1) 信号放大电路设计。微波接收天线采集的原始信号幅值微弱, 且易受环境衰减影响, 无法直接满足ADC采样输入要求。为此本文设计低噪声放大电路, 选用低噪声、高增益射频放大器器件, 结合微波信号幅值变化范围合理设置增益参数。电路在保证信号有效放大的同时, 最大限度降低自身引入的噪声干扰, 提升系统对微弱微波信号的接收灵敏度, 为后续高精度采样提供幅值充足的有效信号。(2) 滤波电路设计。微波信号传输过程中易混入大量带外电磁干扰、谐波杂散与高频噪

声,严重影响采集精度。本系统设计专用射频带通滤波电路,匹配系统工作频段进行频段筛选,精准滤除工作频段以外的干扰信号与杂散分量,保留目标微波信号。通过优化滤波电路参数,改善电路过渡带特性,有效提升输入信号的纯净度,降低后续算法降噪的处理压力^[2]。

(3) 阻抗匹配电路设计。微波高频信号传输对链路阻抗特性极为敏感,阻抗失配会引发信号反射、功率损耗增大等问题。为保证信号高效传输,在预处理链路中设计阻抗匹配电路,依据射频传输理论完成阻抗参数匹配校准,使天线、放大电路、滤波电路及后端采集电路实现阻抗适配,大幅减少信号反射损耗与传输损耗,保障微波信号完整、稳定传输。

2.2 高速数据采集模块设计

(1) ADC芯片选型。结合系统微波工作频段、高速采样速率、测量精度及动态范围核心指标,开展ADC芯片选型工作。优先选择高速、高精度、宽频带的射频模数转换芯片,兼顾采样速率与量化精度,适配高频微波信号的数字化采集需求。同时结合芯片工作电压、功耗、接口特性与温度稳定性完成参数验证,确保器件性能匹配系统整体设计指标。(2) ADC外围电路设计。为保障ADC芯片稳定可靠工作,配套设计完整外围电路,包含高精度时钟电路、基准电压电路与信号输入调理电路。时钟电路为高速采样提供稳定时序基准,抑制时钟抖动带来的采样误差;参考电压电路保障量化精度稳定;输入调理电路对预处理后的微波信号进行幅值适配,避免电压超限导致芯片损坏,为高精度采样提供硬件支撑。(3) 采样时序控制电路设计。高速采样场景下,时序紊乱易引发数据错位、丢点、采样失真等问题。本文设计专用时序同步控制电路,严格匹配ADC采样时序与主控读写时序,实现采样、转换、数据传输的时序协同。通过时序校准与延时匹配,消除高速数据传输中的时序偏差,保证每一组采样数据完整有序,提升高速采集过程的数据完整性与可靠性^[3]。

2.3 主控与数据传输模块设计

(1) 主控芯片选型与电路设计。系统高速数据处理、时序控制、算法运算对主控性能要求较高,选用FPGA作为核心主控芯片,搭建包含时钟、复位、下载接口的最小系统电路。FPGA具备并行运算、高实时性、可编程的优势,可满足微波信号高速采集、实时数字滤波与频谱运算的处理需求,保障系统快速响应与稳定运行。(2) 数据存储电路设计。针对系统高速采样数据量大、实时性强的特点,设计多级存储电路,配置高速缓存完成采样数据临时缓存,解决高速数据流溢出问题。

同时搭载固态存储模块,实现采集原始数据与处理后数据的持久存储,可长时间留存测试数据,方便后续数据分析、溯源与性能校验,提升系统数据存储稳定性与容量冗余^[4]。(3) 数据传输接口电路设计。为实现设备与上位机的数据交互,设计多类型传输接口电路,包含串口与以太网口电路。串口用于系统参数配置、低速调试数据传输;网口依托高速传输特性,实现大批量采集数据的实时上传,保障数据传输高速、稳定、低延迟,满足系统实时数据交互与远程监测需求。

2.4 电源与抗干扰设计

(1) 分级电源电路设计。系统各硬件模块工作电压、功耗需求差异较大,采用分级电源设计方案,通过降压、稳压电路将输入电压转换为各模块所需电压等级。针对射频模拟电路、数字主控电路、存储电路独立供电,有效避免不同模块供电串扰,同时增加电源滤波与稳压保护,保障全系统各单元供电稳定。(2) 硬件抗干扰设计。针对微波系统高频电磁干扰问题,开展硬件抗干扰优化设计。通过金属屏蔽结构包裹射频电路,隔绝外界电磁辐射干扰;优化整体接地布局,减少地环路干扰;结合电源滤波、电路分区布局等方式,降低模块间电磁串扰,有效提升系统电磁兼容性能与复杂工况下的工作稳定性。

3 微波信号数字化采集与处理系统软件算法设计与实验测试

3.1 系统软件总体设计

(1) 软件设计架构。本文采用标准化模块化编程思想开展软件架构设计,依据系统功能需求划分四大独立软件模块,分别为采集控制模块、数据处理模块、数据存储模块与上位机交互模块。各模块功能独立、接口标准化,可实现单独调试与功能迭代,有效降低程序耦合度,提升软件可读性、可维护性与可拓展性,适配微波信号采集处理的整体运行需求。(2) 软件开发环境与工具。系统底层FPGA程序采用专业硬件开发平台完成编码、编译与烧录,实现硬件时序控制与高速数据采集;上位机软件依托可视化开发工具进行开发,完成数据显示、参数配置与数据交互功能;信号处理算法借助仿真软件开展建模与仿真验证,通过多平台协同开发,保障软件运行效率与算法可靠性。(3) 主程序工作流程。系统上电后首先完成硬件初始化、端口配置与参数复位,随后进入循环工作状态。通过采集控制程序驱动硬件完成微波信号采集与模数转换,将原始数据传输至数据处理模块进行算法优化,处理后的有效信号数据通过存储模块留存,同时上传至上位机完成实时显示与交互,形

成完整的软件运行闭环。

3.2 核心数字信号处理算法实现

(1) 数字降噪算法实现。针对微波信号采集过程中混入的热噪声与电磁干扰,基于FIR、IIR数字滤波算法设计适配的降噪处理程序。根据微波信号频段特性设置滤波参数,精准滤除带内随机噪声与杂散干扰,在保留有效信号特征的前提下大幅抑制噪声分量,显著优化信号信噪比,提升采集信号的纯净度。(2) 信号频谱分析算法实现。为提取微波信号频率、幅值等核心特征,采用FFT快速傅里叶变换算法,将采集得到的时域离散信号转换为频域信号,完成时域与频域的快速映射。通过加窗处理减少频谱泄露问题,精准解析信号频谱分布、谐波分量与干扰频率,实现微波信号特征的精准提取与频谱特性分析。(3) 信号失真校正算法实现。针对高速采样过程中因时钟抖动、器件非线性导致的信号失真问题,设计专用失真校正算法。通过建立信号失真补偿模型,对采样数据进行偏差修正与误差补偿,有效改善高速采样带来的波形畸变、数据偏移等问题,进一步提升系统整体采集与测量精度^[5]。

3.3 系统功能调试与仿真测试

(1) 硬件模块单独调试。为保障系统硬件可靠运行,对各功能模块进行单独调试与故障排查。依次测试微波预处理模块的信号放大、滤波性能,检测采集模块的采样稳定性与精度,验证主控模块的时序控制与数据运算能力,逐一排查硬件电路隐患,确保各模块均可独立稳定工作。(2) 软件功能仿真测试。在硬件实物调试前,利用仿真工具对核心信号处理算法进行建模与仿真测试。输入标准微波测试信号,验证降噪、频谱分析、失真校正算法的运行效果,对比仿真前后的信号质量与数据精度,修正算法参数缺陷,验证算法的可行性、稳定性与适配性。(3) 系统联合调试。完成软硬件单独调试后开展全系统联合调试,搭建完整测试平台,实现软硬件协同运行。测试系统信号采集、算法处理、数据存储与传输的全流程功能,检验多模块协同工作的兼容性,排查软硬件匹配问题,保障系统整体运行稳定、数据传输可靠。

3.4 系统性能指标测试与结果分析

(1) 精度测试。选取标准微波信号作为测试源,对系统核心精度指标进行全面测试,主要包含采样精度、信号幅值测量误差与频率测量误差。通过多组重复测试采集实测数据,统计系统测量偏差,全面验证系统的采集精度与测量准确性。(2) 稳定性与实时性测试。开展系统长时间连续运行测试,监测设备长期工作状态下的采样速率、数据完整性与模块运行状态,验证系统工作稳定性。同时统计信号处理、数据传输的延迟时间,评估系统实时处理能力,检验高速工况下的系统运行性能。(3) 测试结果分析。汇总所有实测性能参数,与系统预设设计指标进行对比分析,总结系统在信号采集、降噪处理、实时传输方面的性能优势。同时针对测试中发现的微小误差与性能短板,分析问题成因,并提出对应的参数优化、算法迭代、硬件调试等改进方案。

结束语

本文完成了微波信号数字化采集与处理系统的整体设计,通过硬件电路优化与软件算法迭代,有效解决了微波信号噪声干扰、采样失真等问题,实现了信号高精度采集、提纯与特征分析。经多项测试验证,系统整体性能符合设计标准,运行稳定、实时性良好。后续可进一步优化算法参数、拓展功能模块,提升系统抗干扰能力与场景适配性,为微波信号检测设备的小型化、高精度发展提供参考。

参考文献

- [1]李博文.宽带微波信号数字化下变频采集系统优化设计[J].电子技术应用,2023,49(8):89-93.
- [2]张峰,陈曦.超高频微波信号高精度数字化采集系统设计[J].雷达科学与技术,2024,22(1):102-106.
- [3]刘浩然.基于射频直采的微波信号实时数字化处理系统实现[J].电讯技术,2024,64(5):612-617.
- [4]董佳伟.可重构微波光子信道化采集系统设计与仿真[J].物理学报,2025,74(12):218-225.
- [5]周鑫,吴凯.嵌入式微波信号数字化采集与降噪处理系统研究[J].电子测量技术,2025,48(3):112-117.