

基于时频分析的时钟信号噪声抑制与精度优化研究

张恒

成都天奥电子股份有限公司, 四川 成都 610036

DOI:10.61369/WCEST.2026030040

摘 要 : 时钟信号是电子通信导航测量系统基本时序保证, 时钟信号的纯净度与准确度直接决定设备运行的稳定性。时钟信号在传输采集的过程中易受到环境干扰、器件损耗的影响而产生相位抖动、频率漂移等噪声。传统的噪声抑制方法大多使用单一时域滤波的方式, 无法区分复杂的噪声成分, 精度提高存在局限性。本文采用时频分析的方法, 阐述时钟信号噪声类型和时频分析的基本原理, 分析目前时钟信号处理存在的噪声辨识不清、滤波不匹配、精度校准滞后等现象。借助小波变换和短时傅里叶变换相结合的方法抑制噪声, 建立精度优化的调节系统, 旨在为高精度时序系统提供技术参照。

关 键 词 : 时频分析; 时钟信号; 噪声抑制; 精度优化

Research on Clock Signal Noise Suppression and Precision Optimization Based on Time-Frequency Analysis

Zhang Heng

Chengdu Spaceon Electronics Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610036

Abstract : The clock signal is the basic timing guarantee for electronic communication, navigation and measurement systems. The purity and accuracy of the clock signal directly determine the stability of the equipment operation. During the transmission and acquisition process of the clock signal, it is easily affected by environmental interference and device losses, resulting in phase jitter, frequency drift and other noises. Most traditional noise suppression methods use a single time-domain filtering approach, which cannot distinguish complex noise components and have limitations in improving accuracy. This paper adopts the time-frequency analysis method, elaborates on the types of clock signal noise and the basic principles of time-frequency analysis, analyzes the current phenomena of unclear noise identification, mismatched filtering and lagging precision calibration in clock signal processing. By combining wavelet transform and short-time Fourier transform, noise is suppressed, and a precision optimization regulation system is established, aiming to provide technical references for high-precision timing systems.

Keywords : time-frequency analysis; clock signal; noise suppression; precision optimization

引言

现代电子信息技术飞速发展, 通信基站、卫星导航精密测量、工业控制系统的时钟信号精度要求越来越高。时钟信号属于时序基准, 可以保证各个电子设备同步工作, 保持系统的工作秩序。硬件器件老化、环境温度变化、电磁辐射等都会造成时钟信号的失真, 产生不同的噪声干扰。传统的信号处理方式主要进行时域平滑处理, 无法良好地分辨出频域噪声的特征, 噪声剔除不彻底。时频分析技术既可以得到信号在时域中的特征也可以得到其频域的特征, 满足非平稳时钟噪声处理的要求。本文利用时频分析技术进行研究, 分析时钟噪声产生的原因, 提出科学的噪声抑制方法, 改进信号校准的过程, 提高时钟信号的综合性能, 满足高精度时序应用场合的工作要求。

一、时钟信号与时频分析基础理论

(一) 时钟信号基本特性

时钟信号是周期性交变的电信号, 以一定的频率进行周期性的波动, 给电子系统提供时间基准。信号性能评判指标有频率准确度、频率稳定度、相位平滑度。频率准确度体现的是实际输出频率同标准频率的偏离状况。频率稳定度表征的是短时间内频率

的波动范围, 是评价噪声干扰的主要指标。相位平滑度反映信号波形的连续性, 抖动太大会造成时序混乱。按照硬件类型分, 常见的时钟源有石英晶体振荡器、原子钟、压控振荡器等。

(二) 时频分析技术工作原理

时频分析技术将时域分析和频域分析的优点结合起来, 同时表现信号的时间分布和频率分布情况。传统的傅里叶变换只能得到全局频谱, 无法确定噪声出现的时间。短时傅里叶变换加上滑

动时间窗口，截取局部信号进行频谱转换，达到低频平稳噪声的识别目的。小波变换用可变尺度分析窗口，高频区压缩窗口，低频区拉伸窗口，适合非平稳突变噪声检测。两种算法互相配合，可以准确地区分出不同时段、不同频率的噪声成分，为噪声抑制提供数据支持^[1]。

二、时钟信号处理工作现状

（一）硬件降噪技术广泛应用

目前，大多数电子设备用硬件防护的方式降低噪声干扰。增加屏蔽外壳来隔绝外部的电磁辐射，减小脉冲噪声的影响；采用高精度恒温晶振，控制温度波动，削弱温度敏感型频率漂移；电路内部设无源滤波器件来消除高频谐波噪声；改善布线布局，缩减信号传递途径，削减线路阻抗造成的热噪声。硬件改造操作简便、稳定性好，适合于一般精度的应用场合，是目前使用最广泛的降噪方法。

（二）传统软件滤波流程成熟

常规信号处理系统使用固定的算法来完成软件降噪。均值滤波算法是对离散的起伏做平滑处理，减弱随机白噪声的干扰；中值滤波去除异常突变点位，改善由于脉冲噪声引起的波形畸变；卡尔曼滤波依靠状态方程迭代来修正频率漂移的误差。传统的算法逻辑简单、运算速度快，适合低算力的硬件平台。软件滤波不需要对电路结构进行修改，成本低、易复制，被广泛应用于民用电子设备的时钟校准工作中。

（三）精度校准体系初步搭建

大多数高精度设备具有外部参考时钟，用卫星授时的标准时间进行信号校准。定时采集时钟输出数据，和标准时序信号进行比较得到频率偏差。根据偏差数值微调振荡器的控制电压来修正频率偏移误差。部分设备带有温度补偿模型，根据环境温度的变化来预测漂移的规律，提前完成精度的补偿。基础校准模式可以保证长时间的稳定性，使时钟信号基本稳定。

（四）时频技术应用逐步普及

随着精密测量技术的发展，时频分析也开始被用在高端时钟信号的处理上。在导航、军工、通信领域中用小波变换拆解复杂的噪声，将有效信号和干扰分量分开。依靠短时傅里叶变换监测设备的运行全过程来获取瞬时噪声突变点。采用艾伦方差法对噪声进行分解，准确找到各种噪声的能量所占比例。时频技术克服了传统算法的不足，渐渐成了高精度时钟优化的主要技术手段^[2]。

三、时钟信号噪声抑制与精度优化现存问题

（一）噪声成分辨识精准度不足

传统的处理算法缺少频域分析的能力，难以将叠加的噪声分解开来。大多数滤波算法假定噪声是平稳的，不能识别闪烁噪声、随机游走噪声等非平稳的干扰。脉冲噪声发生时段是随机的，单一时域算法不能找到突变的位置。噪声辨识模糊会造成有用信号被误剔除，噪声残留无法完全去除，优化处理后的信号仍然有轻微的畸变。

（二）滤波算法适配能力偏弱

固定参数滤波算法不能适应工作环境的变化。温度波动引起的电磁干扰强度发生变化时，噪声频谱的特征也会随之改变，静态滤波参数不能适应实时的噪声特征。均值滤波对于低频漂移的抑制效果不好，卡尔曼滤波处理脉冲噪声存在滞后性。各类单一算法各有各的不足之处，组合算法缺少逻辑上的衔接，运算过程繁杂，硬件算力消耗较大。

（三）精度校准存在滞后偏差

常规时钟校准采取周期性比对的方式，两次校准间的间隔时段偏差一直慢慢累积起来。环境突变引起瞬时噪声时，校准系统不能立刻作出反应，瞬时精度就无法得到保证。补偿模型参数固化，不能适应器件老化引起的噪声特征的变化。人工设定补偿阈值有主观误差，长时间运行之后误差越来越大，降低了时钟的长期稳定性。

（四）时频算法应用不够完善

部分高端设备使用时频分析技术，但是算法设置存在明显的不足。短时傅里叶变换窗口尺寸固定，不能兼顾高低频噪声处理精度。小波变换基函数选取没有标准化的依据，人为选择容易造成分解误差。算法运算过程存在冗余现象，数据处理延迟较高，很难达到实时工作的要求。时频分析的优势不能得到充分发挥，优化的效果不能达到精密设备使用的要求。

（五）软硬件协同优化程度偏低

硬件降噪与软件算法优化衔接不紧，未能形成一个统一的优化思想。硬件屏蔽只能消除外部干扰，无法消除内部器件噪声。软件算法优化忽略了硬件损耗的规律，老化器件偏差修正起来比较困难。硬件参数和算法阈值互不影响，并未形成联动调节机制。软硬件衔接脱节会造成资源浪费，导致综合降噪效果存在明显瓶颈^[3]。

四、基于时频分析的优化设计原则

（一）分层辨识处理原则

根据噪声频率分布的变化特征来划分噪声层次，高频脉冲噪声用短时傅里叶变换定位剔除。低频缓慢漂移噪声用小波变换的低频分量做偏差修正。中频段平稳噪声加上均值滤波来消除。区分不同的噪声来源，外部干扰噪声用硬件屏蔽来阻断，内部器件噪声用软件算法优化。分层处理可以很好地匹配算法的优势，降低有用信号的损耗。

（二）动态参数适配原则

结合环境温度、工作时间长短和信号强度变化情况来对参数做调整。依靠时频分析对噪声频谱的变化进行实时监测，自动调节小波分解层数、变换窗口尺寸。按照噪声能量占比来调节滤波权值，加强高强度噪声抑制的力度。通过参数的实时更新来满足不断变化的环境要求，避免使用固定算法而出现的处理盲区问题，从而提高整个系统的工作性能。

（三）实时精准校准原则

缩短时钟信号校准间隔，依靠时频分析对相位偏差、频率偏移做实时的计算。建立动态补偿模型，根据器件老化速率、温度变化规律预测漂移趋势。同步修正瞬时偏差和长期偏移，兼顾短期精度和长期稳定性。改进校准运算逻辑，缩减冗余计算流程，

减小系统延迟，保证高精度实时调节^[4]。

五、基于时频分析的噪声抑制与精度优化策略

（一）构建时频联合噪声辨识模型

将短时傅里叶变换和小波变换的优点结合起来，建立混合辨识模型。用短时傅里叶变换对信号做快速扫描，找到脉冲噪声的突变点来确定异常波形区段。用多层小波变换分解信号分量，将高频噪声、低频漂移和有效信号分开。根据艾伦方差来确定各个噪声的能量所占的比例，从而判定噪声的危害等级。划分噪声类型并完成分类标记，为差异化的降噪处理赋予精确的数据支撑，从而提高噪声识别的准确度。

（二）设计分层自适应降噪算法

根据噪声识别的结果来执行分层降噪。对高频脉冲噪声进行截取，选取异常时频区段，用阈值屏蔽法去除畸变波形。对于中频白噪声，用改进均值滤波来平滑波动，保留原始信号的波形特征。对低频闪烁噪声和随机游走噪声进行小波阈值函数的改进，减弱低频漂移趋势。动态调节滤波阈值，防止过滤引起信号失真，达到降噪、保证信号完整性的目的。

（三）优化动态精度校准流程

建立实时闭环校准体系，用高精度授时信号作为基准参照。时频模块对时钟输出信号进行实时采集，得到频率偏差和相位抖动。根据历史运行数据建立老化预测模型，预测器件损耗引起的偏差变化。自动调节压控振荡器输入电压来修正频率偏移误差。改善校准触发机制，偏差大于阈值立刻执行校准程序，缩减校准时间，保证信号长久高精度输出。

（四）完善软硬件协同优化架构

升级硬件电路改善基础工作环境，用双层电磁屏蔽结构隔离外部干扰。加装智能温控模块，将振荡器的工作温度控制在一定的区间内。简化信号传输线路，减小线路阻抗造成的热噪声。经过硬件预处理的纯净信号送到算法处理单元，用时频分析来完成深度降噪。算法反馈调节硬件工作参数，达到温度、电压动态调节的目的，形成闭环优化结构。

（五）改良算法运算运行逻辑

优化时频分析算法的运算流程，简化矩阵变换的过程，减小计算量。选择最优的小波基函数，根据信号的波动特性来选择合适的分解函数。压缩非关键频域数据，只保留有用的频谱信息，减小运算延迟。确定优先级顺序，先做瞬时噪声处理，再做长期漂移处理。根据嵌入式硬件运行环境的特点来保证算法在低算力设备上正常工作，提高方案的实用性^[5]。

六、实验测试与结果分析

（一）实验测试环境搭建

建立常温密闭电磁屏蔽实验室，控制环境温度不变，消除外界干扰。采用普通石英晶体振荡器作为测试时钟源，配合高精度时序分析仪进行采集信号。设置对照组用传统的滤波优化方法，

实验组用时频分析优化的方法。统一采样频率、采样时长，记录原始信号、降噪信号、校准信号各项数据。全程保证硬件参数一致，使实验结果对比具有公平性。

（二）实验评价指标设定

选择四个主要指标来评价优化的效果。用信噪比来衡量噪声抑制的能力，数值越大，噪声残留就越小。采用艾伦方差判定频率稳定度，数值越小代表波动越小。用相位抖动来表示瞬时波形质量的好坏，偏差越小，波形就越平滑。用频率漂移率来判定长期精度，数值越小，老化影响越弱。四项指标综合评判优化方案的可行性，以量化的方式分析改进的效果。

（三）实验数据对比分析

原始时钟信号信噪比小、噪声叠加严重，艾伦方差数值大。传统滤波处理之后高频噪声被抑制了，但是低频漂移的改善效果不大，相位抖动依然存在。使用时频分析优化方案之后，高低频噪声一起被剔除，信噪比明显提高。艾伦方差明显下降，频率的波动也被控制住了。相位抖动大大减小，波形的光滑度提高。频率漂移速率明显减缓，长期精度保持能力比传统的算法更好。

（四）实验优化效果总结

实验结果说明，时频分析技术可以准确地识别出混合噪声的成分，分层地完成噪声剔除。与传统单一的滤波算法相比，该方案对高频脉冲噪声以及低频漂移噪声都有处理，因此优化的维度也更加全面。软硬件协同架构可以减小由于硬件损耗造成的干扰，从而提高高精度保持时间。算法运算时间满足实时工作要求，适合嵌入式时钟控制系统。该方案稳定性好、适配性强，有工程推广应用的价值。

七、结论

本文以时频分析技术为手段对时钟信号噪声抑制和精度优化进行研究，整理时钟信号噪声类型及时频分析的工作原理，总结目前信号处理中辨识不准、算法适配弱、校准滞后、协同性差等问题。按照分层处理、动态适配优化的原则建立时频联合辨识模型，提出分层降噪算法来改善闭环校准的过程，改进软硬件协同结构。经过实验可知，该方案可以有效地去除各种噪声干扰，提高信号的信噪比以及频率稳定性，减小相位抖动和频率漂移。后续可以对算法进行压缩，适合更多的时钟硬件类型，进一步降低工程应用成本，为通信导航测量领域高精度时钟系统提供可靠的支撑。

参考文献

- [1] 成谷，张宝金. 基于倍频对称子波的时频分析方法[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(11): 80-90.
- [2] 李振兴，李冬，刘建男. 基于 EMD 和时频分析的遥测振动信号降噪方法[J]. 兵工自动化, 2025, 44(10): 35-39+55.
- [3] 朱拥勇，李宗吉，王世哲. 基于 HHT 时频分析的水声信号特性提取与建模[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(23): 122-126.
- [4] 刘文锋，徐林，葛赐雨，等. 200MHz 甚高频低相位噪声时钟信号发生电路的设计与实现[J]. 电子器件, 2020, 43(06): 1352-1357.
- [5] 李鹏，席虹标，陈国帅. 基于 PLL 技术低相噪时钟信号光纤传输系统[J]. 大众科技, 2020, 22(05): 8-10+13.