

时间频率信号的完好性监测方法研究*

李雨薇^{1,2,3} 王文利^{1,2} 孟令达^{1,2,3} 李丹丹^{1,2,3}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600;

2. 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 高精度时间频率信号稳定性和可靠性是现代导航的重要基础,直接影响系统时间基准和导航定位结果。为了保证高精度时间频率信号的稳定性和可靠性,研究时频信号完好性监测方法。并在此监测方法上,充分利用中国科学院国家授时中心生成并保持的 UTC(NTSC)建立高精度时频信号监测系统。该系统可实时监测时频信号性能,检测异常,并及时响应以保证时频信号的完好性和系统时间基准的稳定性。完好性监测方法已被充分验证并应用到时频和导航系统

关键词: 完好性监测;故障排除;及时响应;实时处理

中图分类号: TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on integrity monitoring method of time-frequency signal

Li Yuwei^{1,2,3} Wang Wenli^{1,2} Meng Lingda^{1,2,3} Li Dandan^{1,2,3}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, National Time Service Center, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The stability and reliability of high-precision time-frequency signal is an important basis for modern navigation. It directly affects the accuracy of system time and navigation results. To solve the problem, the integrity monitoring method for physical time frequency signal has been researched on. In this paper, based on the proposed method, a high-precision time-frequency signal integrity monitoring system has been constructed using the UTC (NTSC) in National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences. The system can real-time monitor the performance and the integrity of signal, immediately response to the trouble, resolve the problem and provide the high-precision physical signal more stability and reliability. The integrity monitoring method is verified and applied in many navigation systems and time frequency measurement systems.

Keywords: integrity monitoring; troubleshooting; immediately detect and respond; real time

0 引言

高精度时间频率测量是现代前沿科技的重要基础。时间频率信号准确性和可靠性则为精密测量提供保证^[1]。对于导航系统来说,时频信号作为产生系统时间的源头,其稳定性和准确度直接影响系统时间和导航定位精度。当时频信号出现缺失、性能质量下降等异常情况时,则会导致系统时间异常,使导航系统无法正确定位导航。所以,保证时频信号的稳定性和可靠性是精确导航的基础。

本文主要研究如何实时监测时频信号的完好性,识别异常并及时响应,以保证时频信号的稳定性和可靠性,最终提供稳定可靠的时频信号精确导航定位。利用中科院国家

授时中心现有的科研条件,设计并搭建高精度时间频率信号完好性监测系统,研究其完好性监测方法。在信号性能下降时,系统可自动识别,并做出相应的判断、决策和处理,以保证信号质量,提供高精度、高可靠、高稳定性的频率源。该完好性监测方法已被充分验证并应用到时频和导航系统中。

1 系统搭建

时间频率信号完好性监测系统由软件和硬件两部分组成。硬件部分主要由各种频率源、多通道相位噪声测量系统和工业控制计算机组成。

频率源可由各种原子钟、高稳晶振组成,作为系统的时

频信号。多通道相位测量系统是由服务器、MMS 和路由器组成。服务器负责 TSC MMS 内部文件更新,数据底层管理;TSC MMS 负责信号相位测量;路由器提供网络环境,将 TSC MMS 测量结果传输至用户。本系统为最简配置,仅使用其核心测量设备。MMS 负责测量各个输入信号与内部晶振的相位差。工业控制计算机负责与 TSC MMS 通讯,完成所有的数据处理。系统结构如图 1 所示。

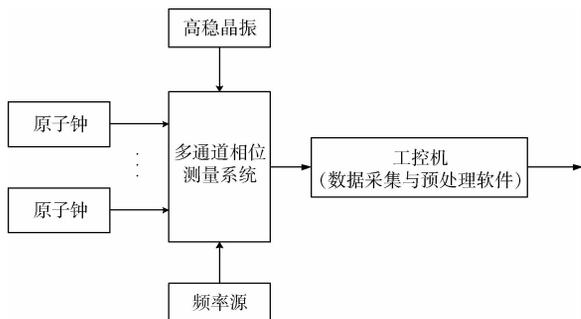


图 1 时间频率信号完好性监测系统结构

软件部分为自研的数据采集与处理软件,在工业控制计算机上运行,使用 Labwindow/CVI 虚拟仪器编程完成^[2-7]。软件负责接收多通道相位测量系统测得的各个通道与仪器本振相位差值,对数据进行分析处理后,得到各个通道与参考通道的相位差值。并根据获得的数据,做出相应的判断、决策和处理。同时,计算输入信号的艾伦方差,完成实时对原子钟各类参数的监测和状态分析,并做出性能判断,评估信号质量。

2 完好性监测方法

时频信号的完好性直接决定系统参考时间的稳定性和可靠性^[8]。因此,系统需自动识别信号的异常现象,以保证正常运行。主要包括相位跳变、频率跳变、信号缺失及性能下降。

系统核心测量设备为 TSC MMS^[9-10]。它采用双混频时差测量原理,可测量 1~20 MHz 的正弦信号,最多可达 28 路。测量分辨率 500 fs,每秒通过网口输出输入信号与自身内部晶振产生信号的相位差个数。简化的测量原理如图 2 所示。

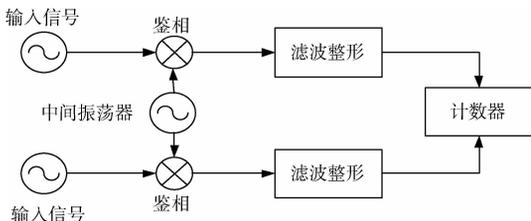


图 2 简化 TSC MMS 测量原理

将输入信号分别与中间振荡器混频,得到差拍信号,滤波整形后,用计数器测量由两个完全对称通道输出的低频

差拍信号的相位差,通过双重混频,使得信号之间的相位差倍增,大大提高测量的分辨率。

根据双混频时差测量原理,可知 TSC MMS 输出的数据为 $\Phi_{MA}(t)$ 和 $\Phi_{MB}(t)$, 对应时刻两者相减即可得到相应两路输入信号的相位差值即 $\Phi_A(t) - \Phi_B(t)$ 。同时,根据 $\Phi_{MA}(t)$ 和 $\Phi_{MB}(t)$, 通过简单的运算,还可以得到: $\Delta f_{ac}(n)$ 和 $\Delta f_{bc}(n)$ 。

- 1) $\Delta f_{ac}(n)$ 输入信号 a 与中间振荡器的相对频差;
- 2) $\Delta f_{bc}(n)$ 输入信号 b 与中间振荡器的相对频差。

利用上述两组数据,设计完成完好性监测。

2.1 信号缺失的检测

对于鉴相输出的正弦信号,在不考虑噪声的情况下可表示为:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

式中: A 为信号的幅度, φ 为信号的初始相位。如果对该信号用 f_s 的采样率对该信号进行采样,则采样后的信号可以用如下序列表示:

$$s_i = A \sin\left(\frac{2\pi f_i}{f_s} + \varphi\right) \quad (2)$$

$s(t)$ 频率为:

$$f = \arccos\left(\frac{s_{i+1} + s_{i-1}}{2s_i}\right) \cdot \frac{f_s}{2\pi} \quad (3)$$

由此可知,在已知信号采样率的前提下,只要获得连续 3 个采样点就可以计算出信号的频率值。

针对信号缺失的异常检测,采用 3 点测频法测量鉴相输出信号的频率,然后与门限值 G_F 进行比较,判断信号是否缺失。若数据缺失,使用最小二乘法拟合当前时刻的相位差值,保持信号的完整性。

当信号缺失时间超过设置的时间上限时,则弹出提示,信号缺失。若系统配备切换开关,则可向切换开关发出切换命令,实现信号的无缝切换。

2.2 相位跳变的检测

根据 TSC MMS 测量原理和计数器原理,输入信号正常情况下,相邻 2 s 的相位差值在 10 ± 1 范围内,若在正常范围内,则认为该输入信号未发生相位跳变。实时分组保存测量数据在缓存中,计算单个通道相邻 2 s 的相位差值,反之,若相位差值未在正常范围内,则判断是否所有输入通道均发生相同的情况。若所有通道均发生此相位跳变,读取 offset 的数值, $offset > 9.999\ 9$, 则说明测量设备内部晶振发生跳变。若小于,则设备正常。提示检查输入信号。若其中某一路发生相位跳变,在有切换开关时,可发出指令,自动切换,若没有,提示检查该路输入信号。

2.3 频率跳变的检测

信号的频率跳变可表现在相位跳变的信息中。利用相位差值,计算出瞬时频率差值。对频差的历史值进行拟合预测当前时刻频差数值,通过设置预测频差值与实测值的门限值,判断信号频率是否发生跳变。

当频率发生跳变后 5 s 内,若仍未跳变回原值时,则软件界面弹出提示,该通道信号发生跳变,建议切换至可用的信号。若 5 s 内跳变回原值,则认为该信号仍然可用。

2.4 频率稳定度变化的检测

频率稳定度是表征信号质量的重要参数之一。通常频率稳定度用 Allan 方差 $\sigma_y^2(\tau)$ (ADEV) 来衡量^[1]。实际上多用其平方根 $\sigma_y(\tau)$ 来表征。对于信号源来说,其时域上的频率稳定度可以通过测量相位差和频率差得到。此处式(4)由收集到的相位数据计算。

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2} \quad (4)$$

式中: $x(i)$ 是以时间间隔为 τ 的测量中, $N = M + 1$ 个相位数据的第 i 个。当频率稳定度数值持续增大时,则认为此路输入信号性能下降。采用三角帽算法进行检测。

经过双混时差计算可得输入信号 a 与输入信号 b 的相对频差 $\Delta f_{ab}(n)$, 根据以上的数据, 分别计算频率稳定度 σ_{ac}^2 、 σ_{bc}^2 和 σ_{ab}^2 。

使用三角帽算法, 可得:

$$\begin{cases} \sigma_{ab}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{ab,i+2} - 2x_{ab,i+1} + x_{ab,i})^2 \\ \sigma_{ac}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{ac,i+2} - 2x_{ac,i+1} + x_{ac,i})^2 \\ \sigma_{bc}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{bc,i+2} - 2x_{bc,i+1} + x_{bc,i})^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_a^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{ab}^2 + \sigma_{ac}^2 - \sigma_{bc}^2) \\ \sigma_b^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{ab}^2 + \sigma_{bc}^2 - \sigma_{ac}^2) \\ \sigma_c^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{ac}^2 + \sigma_{bc}^2 - \sigma_{ab}^2) \end{cases} \quad (6)$$

通过对 σ_a^2 、 σ_b^2 和 σ_c^2 实时分析评估即可完成对输入信号频率稳定度的监测。如果某路输入信号性能下降, 则弹出提示, 手动或者由软件自动切换至其他性能稳定的输入信号。

3 系统测试

对系统测试主要包括时频信号完好性监测。分别有对输入信号有无和跳变的监测、对输入信号频率稳定度的监测以及异常情况的处理和响应。测试的参考信号为 UTC (NTSC), 接入输入通道 1、2、9、10、12 为待测信号。实时数据显示界面如图 3 所示。

当输入信号 2 持续缺失时, 软件弹出提示界面, 如图 4 所示。

当输入信号 9 性能下降时, 软件弹出提示界面, 并推荐可以选用的输入信号, 如图 5 所示。

如图 6 所示, 应用到时频系统的时频信号监测界面, 可以看出, 在出现异常情况下, 系统及时作出响应。同时, 保证了时频信号的稳定性和可靠性。



图 3 TSC MMS 实时数据显示界面



图 4 信号缺失时提示界面



图 5 信号性能下降时提示界面

4 结 论

本文研究信号完好性监测方法, 解决了多种频率源实时监测的问题。设计并完成时间频率信号完好性监测系

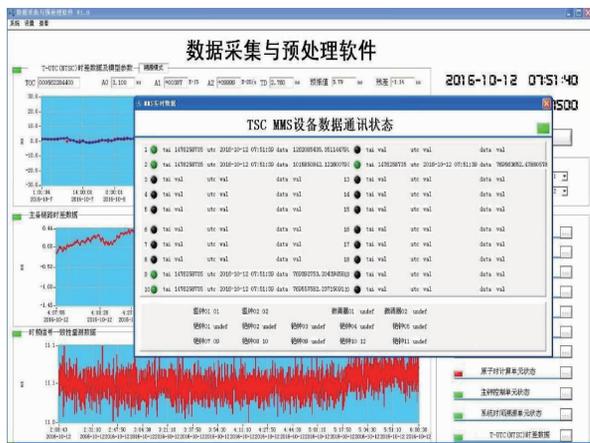


图6 时频系统中监测界面

统。该系统智能化、实时化的完成对时频信号的完好性监测及故障的快速排除和响应,能自主监测输入信号的有无和性能,完成对精密频率源的监测和状态分析。同时,具有强扩展性和应用性。可用作守时钟房时频监测,也可提供高精度高可靠高稳定度的物理参考信号,作为其他信号的基准。也可增加设备,完成信号冗余备份,进一步提高适用性。

参考文献

- [1] 李孝辉,杨旭海,刘娅,等. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 吴志国,韩宝林,刘晗,等. 基于 LabWindows /CVI 的数字示波器自动检定系统[J]. 计量与测试技术,2016,

43(10):69-71.

- [3] 雷晓锋,李涛. 时钟共享多线程处理器通信机制的设计与实现[J]. 微电子技术,2016,42(3):42-46.
- [4] 王旭,姚兰,温世仁,等. 基于 Labwindows /CVI 的发射机测试系统软件设计[J]. 宇航计测技术,2016,36(4):101-104.
- [5] 俞宙,李静,魏亚峰,等. 基于虚拟仪器的高速混合信号自动测试系统设计[J]. 仪器仪表学报,2016,37(S):95-100.
- [6] 薄志峰. 基于 Labwindows/CVI 的电动舵机自动化测试系统设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(5):66-69.
- [7] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 网络化时频测试实验室关键技术分析与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(4):409-415.
- [8] 杨传森. 卫星导航用户端自主完好性监测理论问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [9] 李雨薇,刘娅,李孝辉. 多通道比相仪 TSC MMS 测量性能分析[J]. 时间频率学报,2011,34(1):9-15.
- [10] 沈季良,蔡勇,马南雪. 用双混频时差法测量频率的相位差和频率稳定度[J]. 中国科学院上海天文台年刊,2000:154-156.

作者简介

李雨薇,工学硕士,助研,主要研究方向为高精度时间频率测量技术、频率源驾驭技术等。

E-mail:liyuewei9999@163.com