

基于动态反馈控制生成精确时间戳的时间间隔测量方法研究

刘成路 梁坤(通讯作者) 李雨峰

(北京交通大学自动化与智能学院)

摘要:针对目前基于计数器的传统时间频率采集系统采样间隔不精确,时频测量数据性能分析功能单一且无法实现参数指标实时分析、显示的问题,本文介绍了一种基于动态反馈控制算法生成精准时间戳的时间间隔测量方法,并将采样间隔的动态补偿与时间戳累积误差校准进行有效结合。同时,为实时分析显示计数器测量结果与数据图像,设计开发了一款改良型时间频率测量分析系统,并给出实时性能指标分析。

关键词:动态反馈控制算法;精准时间戳;时间频率测量分析系统

DOI:10.15988/j.cnki.1004-6941.2025.7.002

Research on Time Interval Measurement Method Based on Dynamic Feedback Control to Generate Accurate Timestamps

LIU Chenglu LIANG Kun LI Yufeng

Abstract: In response to the problems of inaccurate sampling intervals, single performance analysis functions for time-frequency measurement data, and inability to achieve real-time analysis and display of parameter indicators in traditional counter based time-frequency acquisition systems, this paper introduces a time interval measurement method based on dynamic feedback control algorithm to generate accurate timestamps, and effectively combines dynamic compensation of sampling intervals with accumulated timestamp error calibration. At the same time, an improved time-frequency measurement and analysis system was designed and developed for real-time analysis and display of counter measurement results and data images, and real-time performance indicator analysis was provided.

Keywords: dynamic feedback control algorithm; accurate timestamp; time frequency measurement and analysis system

0 引言

时间是目前世界上准确度最高、应用最广的物理量,随着科技的发展,对其精度的需求也不断提高^[1-3]。为了评估时钟性能,实验室通常采用频率

测量和时间间隔测量。其中,高精度频率测量(如频差倍增法和相位比较法)^[4]的分辨率较高,但结构复杂、成本较高;时间间隔测量包括直接计数法、游标法、抽头延迟线法和差分延迟线法等,但直接计

基金项目:国家自然科学基金(项目名称:基于GNSS多传感器融合的移动载体精准时间传递与同步,项目编号:12473072);国家铁路智能运输系统工程技术研究中心开放课题(项目名称:基于全/共视的车载设备时间频率同步与监测方法研究,项目编号:2023YJ360)

作者简介:刘成路,硕士研究生,主要研究方向:精密测量、时间频率传递和同步等。

数法测量范围较大,易于实现,但分辨率较低。因此,需结合多种方法对测量范围与精度进行平衡与优化^[5]。为了实现计数器的远程控制、数据的自动采集、性能的实时分析等功能,相关科研人员设计了一系列测量系统^[6-8],但仅支持数据采集,且部分支持后处理生成相对频率偏差和频率稳定度图像,无法实时显示。同时,该类软件未考虑并解决采样间隔准确性问题及程序的运行时间。因此,尽管单次误差较小,但累积后可能导致时间戳重复或跳秒,严重影响数据分析的准确性。

本文拟采用动态反馈控制算法保持系统的采样间隔,并提出相应的解决方案。

1 基于动态反馈控制的精准时间戳方法

SR620 因具有测量范围较大、精度较高(分辨率25ps)、操作简便的优点,成为了时频领域目前最常见的时间间隔测量仪器。因此,本文采用其测量时间间隔的方法,对时钟时频性能进行评定^[8-12]。同时,为消除网络时间同步(Network Time Protocol, NTP)的影响,关闭了数据采集主机的 NTP 功能,并设置采样间隔为1s。基于 SR620 采用原商用时间间隔采集软件记录的相邻时间戳差值如图1所示。

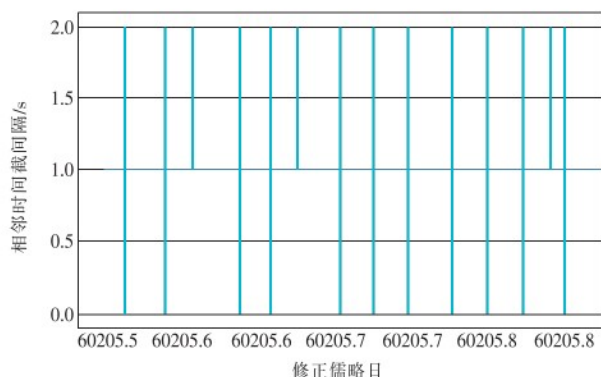


图1 相邻时间戳差值

由图1可知,相邻时间戳的间隔相较于所设置的采样间隔存在大量的异常值。其原因主要在于主机端计数器控制程序未能精准控制2次数据采样的时间间隔,即当主机控制计数器数据采样间隔较小时,会出现时间戳静止的现象;当计数器数据采样间

隔较大时,可能会出现跳秒现象。异常时间间隔模型的计算公式为:

$$t_{\text{interval}} = t_{\text{set}} + t_{\text{program}} + t_{\text{pause}} \pm t_{\text{error}} \quad (1)$$

式中: t_{interval} ——系统每次的真实采样间隔时间,s; t_{set} ——预期的采样间隔,s; t_{program} ——系统采样与数据分析所消耗的时间,s; t_{pause} ——暂停程序运行的时间,s; t_{error} ——暂停误差,s。

当两个时间戳相等或跳值时,会影响阿伦方差等以均匀采样间隔为前提的数据指标计算,且当相邻时间戳相等时,在同一时刻会对应多个测量数据,导致无法确定数据的准确取值。因此,为了确保计数器测量数据时间间隔的准确性,本文基于动态反馈控制算法,对式(1)中所包含的误差进行修正,如图2所示。

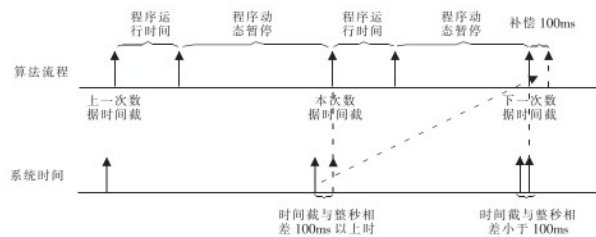


图2 时间戳反馈控制算法示意图

(1)根据系统发起计数器记录数据操作请求前的相邻两次的系统时间,动态计算程序运行花费的时间,并作为参数反馈至暂停测量函数,从而动态改变程序暂停时间。暂停时间的实时补偿计算公式为:

$$t_{\text{pause}} = t_{\text{set}} - (T_{\text{end}} - T_{\text{start}}) \quad (2)$$

式中: T_{end} ——前一次数据采样时的时刻,s; T_{start} ——程序运行至数据采样前的时刻,s。

(2)将采样间隔误差中用于系统采样与数据分析的时间进行修正补偿。由于该方法未考虑暂停函数本身运行延迟及暂停误差所带来的影响,无法完全确保时间戳的准确性,因此,在记录的时间戳毫秒位超过阈值时,需对暂停时间进行再次补偿,使每次测量的时间戳与预期始终保持在所设定的误差范围以内,即当 $|T_{\text{start}} - [T_{\text{start}}]| > \tau$ 时,则:

$$t_{\text{pause}} = t_{\text{set}} - (T_{\text{end}} - T_{\text{start}}) - \tau \quad (3)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ ——对时间的取整,s; τ ——设定的补偿阈值,s。

设计的时间间隔测量系统记录的相邻时间戳间隔如图3所示。由图可知,测量数据时间戳异常的问题已完全解决,且时间戳间隔与设置的采样间隔能保持一致。

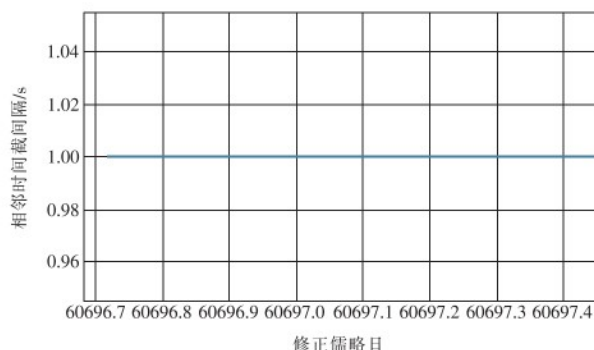


图3 精准时间戳的相邻采样时间戳差值

2 系统开发与实现

设计的时间频率分析系统软件主要由参数设置模块、数据采集与指标分析模块、结果储存与显示模块组成。其中,参数设置模块主要是为用户提供可交互的窗口,使其能自由更改如采样间隔、开门端、触发电平等一系列测量参数;数据采集与指标分析模块可通过对测量数据的实时采集与解析,得到时钟性能的一系列指标;结果储存与显示模块不仅能将时钟性能指标进行实时显示与储存,而且能直观看到被测时钟的运行情况。

此外,为了确保系统长时间连续测量和分析图像实时显示的稳定,对测量系统的结构进行了优化,即使用多个子线程实现不同实时功能。该系统不仅占用内存更小,而且提升了可靠性,解决了多线程软件长期运行时存在的系统崩溃隐患的问题。

3 试验验证

时间频率性能测试实验连接示意图如图4所示。首先,设置计数器为上升沿触发、触发电平为1V、采样间隔为1s;然后,在修正儒略日(Modified

Julian Day, MJD)60562~60568期间内,依次使用时频测量系统、原计数器软件、比相仪,对被测时钟源进行测量,再对时频测量系统与商用计数器软件所采集时间间隔的相邻时间戳时间间隔结果进行计算。结果表明:两者完全一致。

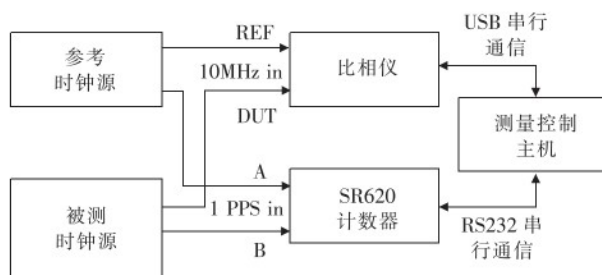


图4 时间频率性能测试实验连接示意图

商用软件仅能记录时间间隔数据,无法直观表示时钟性能,且测量结果采样间隔为非均匀性,存在暂停和跳秒现象。因此,需进行后处理。同时,为了便于对比,采用均匀数据。时频测量系统与传统计数器软件的后处理的如图5所示。

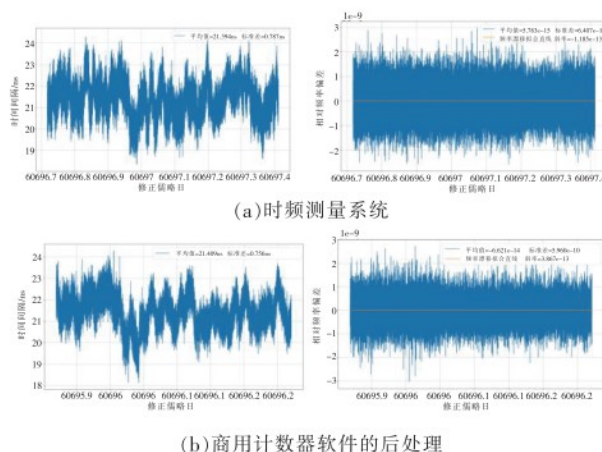


图5 时间间隔和相对频率偏差结果

由图5可知,两种软件的测量平均值相差约0.01ns,标准差相差约0.03ns,标准差均为 10^{-10} 量级,频率漂移率为 10^{-13} 量级,时间间隔结果均符合时钟源的客观特性。

不同取样间隔的时频稳定度结果如图6所示。由图可知:(1)时间频率测量系统与比相仪的数值并不完全相同,但在趋势上基本一致。其原因是测量方式的不同。(2)商用计数器软件与时频测量系

统在量级上保持一致,但由于其采样间隔非均匀,存在暂停和跳秒现象,会导致结果存在较大畸变,尤其是修正阿伦方差与时间方差的长期稳定度会突然剧烈下降,与其他实验结果相悖。

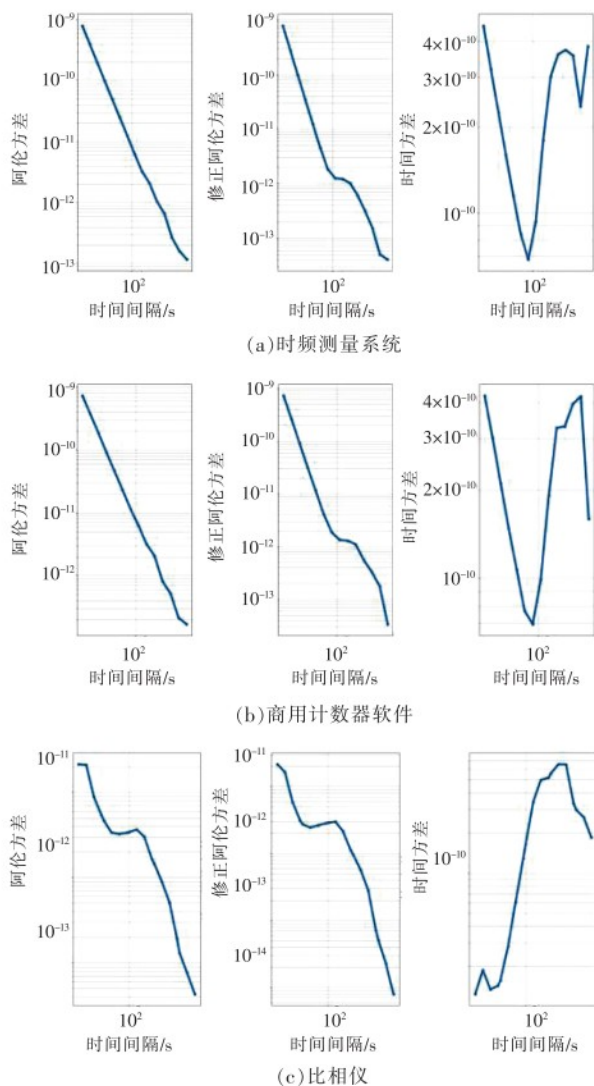


图6 时间频率稳定度

由此可知,时频测量系统能稳定运行,且测量无异常中断或错误,相邻时间戳间隔与设置的采样间隔能完全保持一致。

将参考时标与被测时钟进行比对后,可得测得时钟的性能指标,即平均时间偏差 21.394ns、抖动 0.787ns、平均相对频率偏差 10^{-15} 量级、频率漂移率 10^{-13} 量级。由于万秒的频率稳定度达到了 10^{-13} 量级,时间稳定度为亚纳秒量级,测量结果在预期范围内,因此时间频率测量系统性能功能正常。

4 总结

综上所述,本文针对传统时频测量系统存在的采样间隔不准确、时频性能分析功能单一且无法实时显示分析参数指标的问题,通过研究一种基于动态反馈控制生成精确时间戳的时间间隔测量方法,设计开发了一款新型的时间频率测量分析系统,并进行了多种系统测量的试验验证。结果表明:(1)该系统运行稳定,且时间戳记录准确,相关测量指标结果均在合理范围内。(2)针对被广泛用于时钟的性能测量和远程溯源、时频传递设备校准等的时差法,可更加便捷地对计数器进行远程参数设置,不仅能对测量数据的时间戳进行更加准确的记录,而且能实时监测被测时钟性能指标。(3)能促进时间间隔测量与分析实验的高效完成。

参考文献

- [1] 林弋戈,梁坤,方占军. 时间单位——秒的演进[J]. 中国计量, 2018, (05): 16-17+49.
- [2] 陈向东,郑瑞峰,陈洪卿,等著. 北斗授时终端及其检测技术[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [3] 黄秉英,肖明耀,马凤鸣. 时间频率的精确测量[M]. 北京:中国计量出版社,1986.
- [4] 秦运柏. 时间频率的高准确度测量方法[J]. 宇航计测技术, 2002, (01): 13-16+41.
- [5] 刘科伟,荆文芳. 多通道高精度时间间隔计数器的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2023, 46(01): 8-20.
- [6] 刘恒,常惠艳,李传杰. 基于 LabVIEW 的时间间隔计数器 SR620 远程控制[J]. 商情, 2013(14): 143-144.
- [7] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 基于 SR620 的远程时间频率测量系统设计及实现[J]. 时间频率学报, 2013, 36(03): 134-140.
- [8] 张宇,梁坤,陈静,等. 基于 SR620 时差测量系统的设计[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(04): 26-29.
- [9] Allan D W. Statistics of Atomic Frequency Standards[J]. Proceedings of the IEEE. 1966, 54(02): 221-230.
- [10] Nienfan Z. Allan Variance of Time Series Models for Measurement Data[J]. Metrologia, 2008, 45(05): 549-561.
- [11] 刘英乾,陈强,薛仁魁,等. 修正的阿伦方差对调相闪烁噪声的抑制[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(04): 68-72.
- [12] 苏建峰,陈淑芳,李孝辉,等. 基于串口的 SR-620 计数器远程控制技术[J]. 时间频率报, 2004, (02): 87-93.