

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417140

# 北斗卫星同步系统中的单核调度冲突及 时间修正算法<sup>\*</sup>

崔海青 郭嘉伟 王凯

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

**摘要:** 北斗卫星同步系统中,一般使用基于FPGA的方案,使用ARM单核系统在调度过程中容易导致资源竞争和实时响应偏差的问题,但是ARM在处理业务逻辑、浮点运算等方面优于FPGA。本文提出了一种基于ARM处理器的北斗1PPS同步和守时的实现方案,采用最小二乘法结合滑动窗口实现同步计算、通过阶段性增长机制实现守时计算,并提出一种延迟修正算法,解决了信号处理中因中断冲突造成的周期边界采集偏差。当系统检测到数据即将溢出时,该算法通过推迟记录上升沿信号的周期值并进行修正。实验结果表明,该算法能够实现 $10^{-8}$  s级别的同步精度,证明了其在高精度时间同步中的可用性。

**关键词:** 北斗;1PPS;最小二乘法;阶段性增长率;延迟修正算法;同步守时系统

中图分类号: TN91; TP23 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5010

## The single-core scheduling conflicts and time correction algorithm in the Beidou satellite synchronous system

Cui Haiqing Guo Jiawei Wang Kai

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In the BeiDou satellite synchronization system, FPGA-based solutions are typically used. However, using an ARM single-core system during scheduling can lead to resource contention and real-time response deviations. While ARM processors are superior to FPGA in handling business logic, floating-point calculations, and similar tasks, this paper proposes a solution for BeiDou 1PPS synchronization and timing based on ARM processors. The synchronization calculation is implemented using the least squares method combined with a sliding window, while the timing calculation is achieved through a phased growth mechanism. Additionally, a delay correction algorithm is introduced to address cycle boundary acquisition deviations caused by interrupt conflicts during signal processing. When the system detects that the data is about to overflow, the algorithm delays recording the rising edge signal's cycle value and applies corrections. Experimental results show that this algorithm can achieve synchronization accuracy at the level of  $10^{-8}$  s, proving its effectiveness in high-precision time synchronization applications.

**Keywords:** BeiDou; 1PPS; least squares method; phased growth rate; delay correction algorithm; synchronous timekeeping system

## 0 引言

时间同步技术是由于通信、航空航天以及科研实验等的需求而发展起来的一门新兴学科,文献[1-6]提出的方法和系统已经取得良好的应用效果,目前,卫星授时技术已经成为当今最广泛运用的时间同步技术。同步守时系统通常需要依赖于一个精确的时间来源作为参考标准,这通常

通过外部的时间基准信号来实现的。其中,北斗提供的1PPS(one pulse per second)信号是一个典型的时间基准信号,它的上升沿精确标示UTC(universal time coordinated)时刻。1PPS时间同步在多个关键领域中发挥重要作用,包括通信网络中的设备同步以优化数据传输、电力系统中的设备操作同步以提高电网稳定性、导航系统中的精确定位以增强卫星定位精度以及科学的研究中的高精度数据采集以

收稿日期:2024-10-17

\*基金项目:中央高校基本科研业务费项目(3122025079)资助

支持实验和观测等方面。

时间同步的常见方法主要包括文献[7-9]提出的网络协议以及文献[10-12]提出的授时型接收机两种模式。其中,网络协议在传输过程中可能会面临延迟等问题,这些因素使得网络协议的模式难以满足高精度时间同步的需求。文献[13]提出光纤时间同步技术、文献[14]提出无线传感器网络、文献[15]提出基于PTP的网络时间同步研究皆为一种基于网络的高精度同步系统,能够实现高精度的时间同步。该方法的复杂度较高,涉及多种高精度算法以及精确的时钟协议,集成了精密的频率源和复杂的网络协议。为确保最终同步精度达到预期水平,必须通过详细的信号传播延迟校正来实现。因此,采用授时方式进行本地时间同步逐渐成为一种更加精确的解决方案,这种方法不仅具有广泛的应用范围,而且系统复杂度相对较低,满足现代应用对时间敏感性的需求。文献[16]提出采用ARM+FPGA架构、通过卡尔曼滤波并结合PID算法针对压控恒温晶振的电压精细调节;文献[17]提出采用FPGA架构结合卡尔曼滤波算法,通过处理相位差,产生高精度、高稳定性的1PPS信号。

与以上方法不同,本文介绍了一种基于ARM处理器的北斗1PPS时间基准信号的时间同步方法。该方法利用北斗系统的1PPS为标准参考源,以ARM为主控处理核心,实现了高精度时间同步,具有系统复杂度低、集成度高、开发便捷和便于数据处理等显著优势。本文的实验平台使用主频为600MHz、定时器频率为300MHz的GD32H737VGT6,北斗模块和原子钟进行验证。

## 1 系统方案描述

基于北斗的同步守时技术分析<sup>[18-19]</sup>以及北斗授时高精度授时<sup>[20-21]</sup>,设计一种基于ARM的同步守时系统,其系统逻辑如图1所示,北斗模块通过天线接收北斗信号输出1PPS,ARM捕获北斗模块输出的1PPS信号并根据定时器计数值生成精确的时刻信息,这些时刻信息在确保通信系统或测量设备过程中的时间精度非常关键,所以使用高主频ARM的方法获得高精度时刻信息,确保了关键应用中的精确性和可靠性。

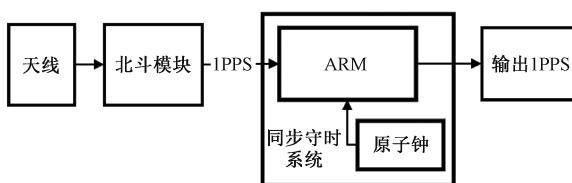


图1 系统原理图

Fig. 1 The system schematic diagram

首先,将北斗的1PPS脉冲信号通过硬件连接进入ARM定时器的输入捕获通道。ARM定时器的输入捕获功能可以精确地捕捉到脉冲信号的上升沿,为后续的时间

测量和时间同步提供基础。

其次,通过配置定时器的捕获功能,当北斗1PPS脉冲的上升沿被捕获到时,定时器能够记录该脉冲的具体计数值。为实现更高精度,通过利用定时器的更新中断功能,计算每个上升沿在计数过程中的准确位置。这一步骤确保可以精确的确定1PPS信号的实际上升沿时刻,基于捕获的时刻数据即可预测下一次上升沿的发生时刻。

最后,利用ARM定时器的另一个通道设置输出比较功能。根据前述计算的预测数据,在预测的时刻到达,定时器的输出比较功能会自动触发,将信号电平进行反转。这种反转动作可以实现对1PPS信号的精准控制,使得系统能够精确输出1PPS信号,提高系统的时间精度和稳定性。

## 2 基于ARM的同步守时算法设计

其具体实现流程如图2所示,首先,系统捕获北斗1PPS信号的周期值和脉冲值进行同步计算和守时计算的预处理。系统通过同步计算生成并输出1PPS信号。接着,系统检测北斗信号的可用性。如果检测到有效的北斗信号,则继续执行同步计算和守时调整过程,若未检测到有效的北斗信号,系统将切换至守时计算模式输出1PPS信号以维持系统的稳定性。

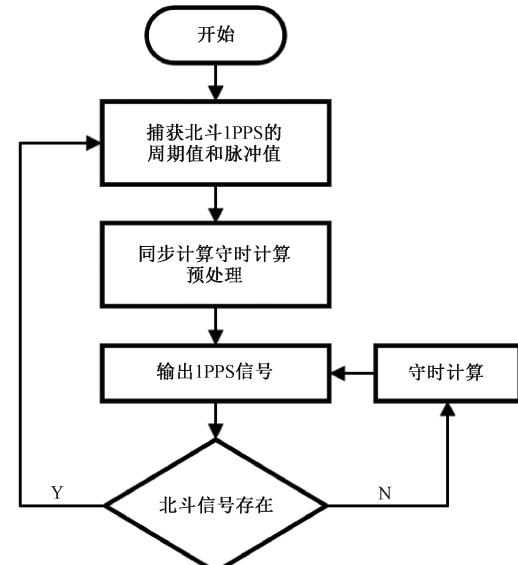


图2 系统运行示意图

Fig. 2 The system operation diagram

基于ARM的1PPS同步守时算法旨在确保系统能够精确地与外部时间源保持同步。该方法需对北斗1PPS信号进行详细的采集和处理,在此过程中,需要充分考虑输入脉冲信号的抖动,以确保系统能够准确捕获和记录北斗1PPS信号的时刻值,从而确保在各种工作条件下稳定且高精度的同步,为高精度时间管理提供坚实保障。

### 2.1 同步算法设计

在北斗模块锁定后提供稳定的高精度1PPS信号,此

时系统开始捕获北斗提供的 1PPS 信号。其中,ARM 使用定时器配合输入捕获记录时刻信息,设置定时器的计数值

为  $n, n$  等于 14 999, 如图 3 所示。

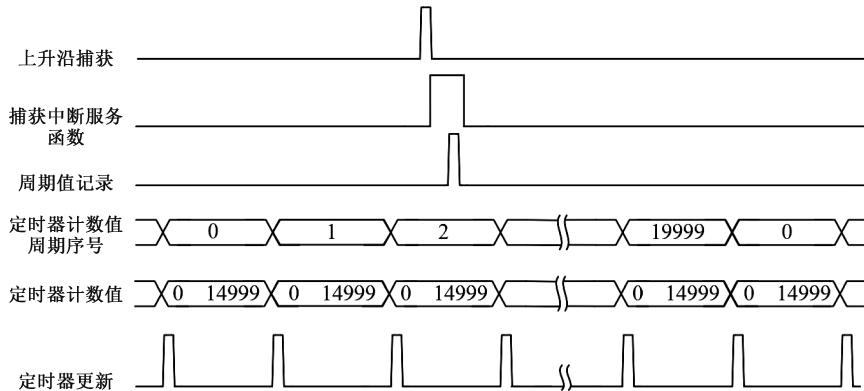


图 3 ARM 采集数据的逻辑示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the data collected by ARM

为了保证数据预测的实时性,采用滑动窗口算法与最小二乘法结合的方法动态处理时间序列数据并进行预测。滑动窗口算法负责处理一些固定大小的连续区域问题<sup>[22]</sup>,最小二乘法是一种数学优化技术<sup>[23]</sup>,如式(1)、(2)所示。

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y'_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y'_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (1)$$

$$intercept = \bar{y} - slope \times \bar{x} \quad (2)$$

其中,  $slope$  表示斜率,  $intercept$  表示截距,通过最小化误差的平方和,拟合已知数据点,进而建立一个数学模型。通过线性回归分析,根据已采集的北斗数据计算下一个时刻的位置数据。

为验证模型的预测能力,采集数据绘制拟合曲线。如图 4 所示,拟合线所预测的值与实际数据值的差值在一个计数单位之内。这表明模型能够准确反映数据变化规律,具有强预测能力和高可靠性。

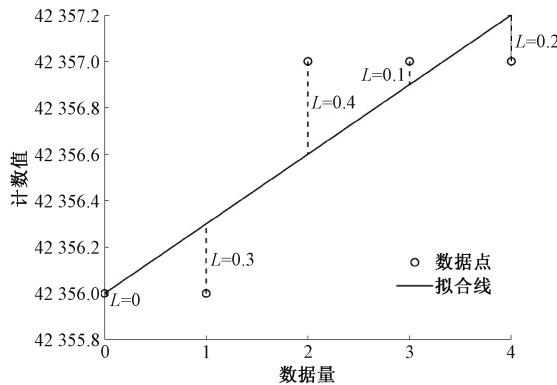


图 4 最小二乘法拟合示意图

Fig. 4 The least square fitting diagram

系统通过拟合结果预测下一时刻的位置,并将预测结果用于更新系统状态。同时,计算数组会随着新数据的不

断采集而持续更新,当数组达到设定容量时,系统会重新进行预测计算。这种循环更新与预测机制使得系统能够实时优化预测模型,确保持续的高精度与可靠性。

## 2.2 守时算法设计

在同步工作中,受卫星信号不稳定性的影响,北斗 1PPS 信号可能出现间歇性中断。因此,系统需在丢去参考信号后,仍能输出高精度的 1PPS 信号,以确保时间同步的稳定性和准确性<sup>[16]</sup>。

在基于同步实验的基础上进行守时算法设计,使用北斗系统提供的 1PPS 数据校准原子钟<sup>[24-25]</sup>。为了应对可能的信号丢失情况,采用分段计算的方法,每隔 5 min 记录一次数据,计算总体时间的平均变化率,如式(3)所示。

$$growth = \frac{ld-fd + growth \times t'}{t} \quad (3)$$

其中,  $growth$  为变化率、 $t'$  表示上次拟合的时间、 $t$  表示本次拟合的时间,  $ld$  表示阶段时间的末尾数据、 $fd$  表示阶段时间的末尾数据,这意味着将数据划分为多个时间段进行分析,以确保在北斗信号丢失的情况下,仍能准确计算平均变化率。该方法有效解决了信号中断问题,使数据分析结果更加稳定可靠,从而在长期运行中仍能获得精确的时间守时数据。

为了更准确地反映整体数据增长趋势,并确保长期计算的可靠性。通过对每一段的数据进行计算,并将这些结果与之前的计算结果加权处理,可以得出在长时间过程中数据的平均变化率,如图 5 所示。

## 3 数据溢出引发的 1PPS 偏差的分析与解决方案

### 3.1 问题分析

1PPS 偏差的问题对比图如图 6 所示,信号 1 表示北斗系统的 1PPS,信号 2 表示 ARM 系统生成的 1PPS。其中,图 6(a)显示了正常的波形,而图 6(b)则表示出现问题时的波形,在这种情况下,北斗模块产生的脉冲信号的上升沿

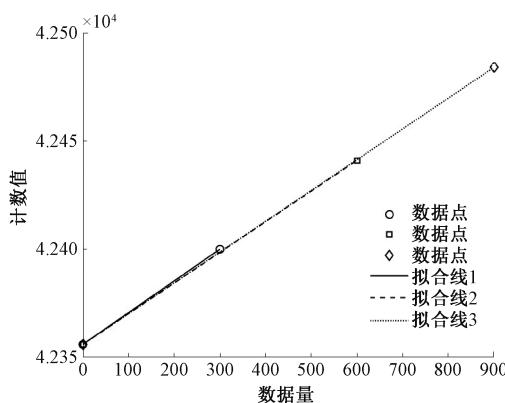


图 5 阶段性拟合示意图

Fig. 5 The phased fitting diagram

与 ARM 产生的脉冲信号的上升沿之间的时间间隔等于一个计时周期。

在基于 ARM 处理器的北斗 1PPS 上升沿数据采集系统中,捕获发生在数据即将溢出时,即捕获数据  $\in [t, n]$  时,周期值可能会记录在不同的时段。这一现象是因为北斗 1PPS 的上升沿所对应的计数值是在捕获触发中断中

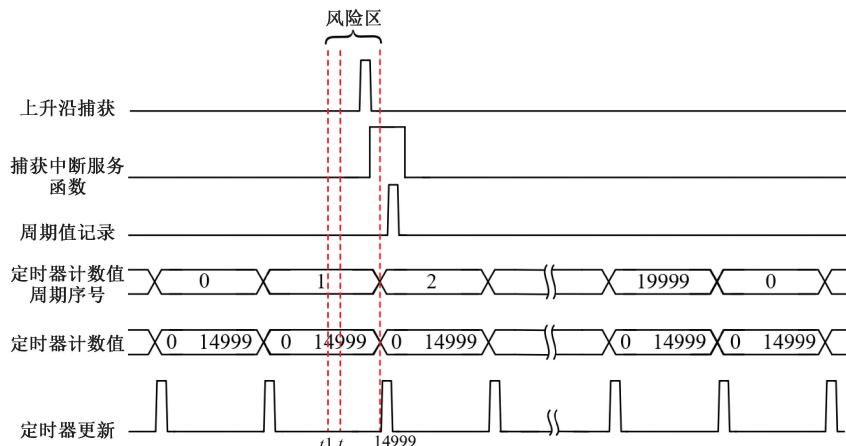


图 7 ARM 中断逻辑图

Fig. 7 The arm interrupt logic diagram

### 3.2 延迟修正算法

为了避免在风险区捕获数据时出现周期值捕捉偏差,可以采用延迟修正方法进行调整。这种方法主要针对的是当信号即将溢出的情况,上升沿捕获数据可能出现在 ARM 处理能力之外时的情况,导致数据存在偏差。通过在捕获中断中实施延迟,可以保证数据在风险区的准确性,减少误差和干扰,从而提高数据的精确度。具体而言,当系统检测到一个上升沿信号时,并不会立即对该时间点进行记录。相反,系统会延迟记录,直到下一个周期的起始时刻。此举旨在避免因周期边界处的信号变化而引入的采集误差,提高时间点记录的准确性和稳定性。通过这种延迟策略,系统能够有效减少边界效应对数据采集精度

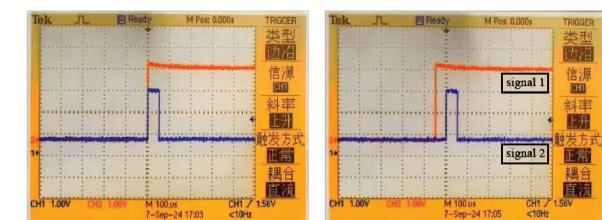


图 6 波形对比示意图  
Fig. 6 The waveform contrast diagram

即刻记录的,而周期值则是在更新中断处理程序中计算的,在捕获中断处理程序中进行记录,其中捕获中断响应到记录周期值的时间约为  $1\ \mu s$ 。为了保证 1PPS 的稳定输出,所以更新中断的优先级大于捕获中断,所以在数据即要溢出时会产生中断嵌套,导致周期值的变化,从而影响时间同步的精度。所以定义  $(t, t_1]$  为冗余区间,  $(t_1, n]$  被定义为周期值偏差风险区,其工作原理如图 7 所示。

因此,为了减少这种不一致性,需要在捕获中断时精确记录脉冲值的同时,在计数器溢出时对周期值进行校正,以确保数据准确性和同步稳定性。

的影响,如图 8 所示。

在上升沿触发中断后,系统将进入捕获中断服务函数,在此函数中会启动一个延时,其中延时长短通常由预先设定的风险区长度值所决定。待延迟结束,即下一个周期到达时,此时再捕获并记录时间。使用此方法可以确保上升沿的时刻被准确测量,从而计算得到准确的周期值。

延迟修正算法通过精确测量和补偿,能够准确捕获和处理北斗的 1PPS 信号。这种算法能够消除由 ARM 调度导致的偏差风险,从而确保接收到的 1PPS 信号具有更高的精度。当与同步守时技术结合使用时,二者的协同作用能够有效降低系统在时间同步过程中所产生的误差,确保输出的 1PPS 信号具有更高的精度,进而提升系统的整体

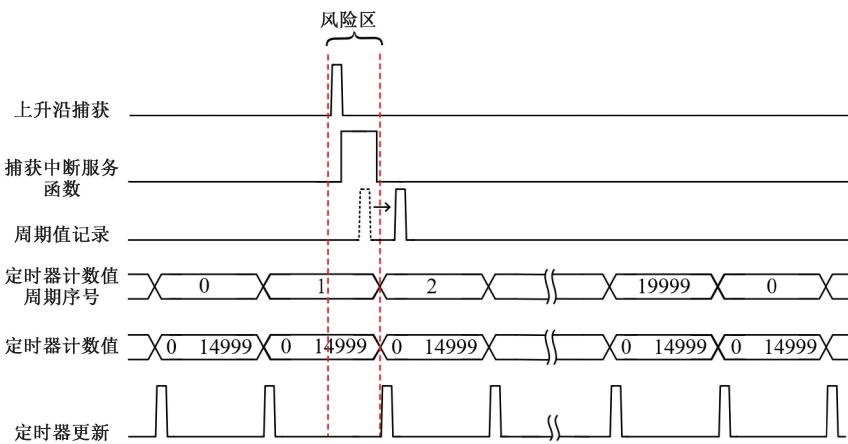


图 8 延迟修正方法示意图

Fig. 8 The diagram of delay correction method

同步稳定性与时间准确性。

## 4 实验结论

### 4.1 同步验证

通过对北斗的 1PPS 脉冲和 ARM 生成的同步脉冲的上升沿, 可以观察到 ARM 系统生成的同步脉冲与北斗系统的 1PPS 脉冲的同步误差。如图 9 所示, 其中图 9(a) 的时间显示精度为 100 ns/div, 图 9(b) 的时间显示精度为 100  $\mu$ s/div, 信号 1 表示北斗系统的 1PPS 上升沿, 信号 2 表示 ARM 系统的同步 1PPS 上升沿。

使用串口助手接收调试数据, 如图 10 所示, 其中 GET 代表捕获的上升沿时刻数据。PRE 代表预测的上升

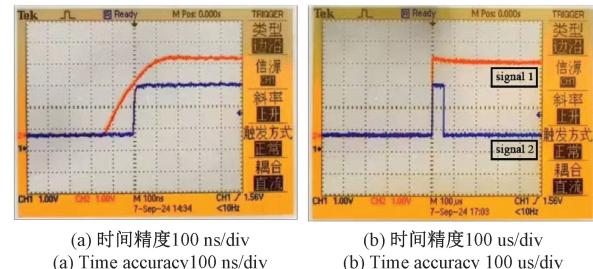


图 9 基于北斗的同步波形示意图

Fig. 9 The synchronous waveform diagram based on Beidou

沿时刻数据, 其中, count 为周期值, 每一个单位变化对应 50  $\mu$ s, value 为计数值, 每一个单位变化对应 10/3 ns。

```
*****  
PRE_count = 19999      PRE_value = 14999  
GET_count = 19999      GET_value = 14999  
*****  
PRE_count = 19999      PRE_value = 14999  
GET_count = 19999      GET_value = 14999  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 0  
GET_count = 0          GET_value = 0  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 1  
GET_count = 0          GET_value = 0  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 0  
GET_count = 19999      GET_value = 14999  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 0  
GET_count = 0          GET_value = 0  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 0  
GET_count = 0          GET_value = 0  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 1  
GET_count = 0          GET_value = 1  
*****  
PRE_count = 0          PRE_value = 2  
GET_count = 0          GET_value = 1  
*****
```



图 10 基于北斗的同步串口打印数据

Fig. 10 The synchronous serial port printing data based on Beidou

长时间的测试以及调试串口的数据打印结果如表 1 所示。ARM 系统生成的同步脉冲与北斗系统的 1PPS 脉冲

冲之间的平均偏差约为 0.58 ns,最大误差都小于 10 ns,同步丢失率为 0%。

表 1 基于北斗的同步数据指标统计表

Table 1 The synchronous data index statistics table based on Beidou

运行时间/s	平均偏差/ns	最大误差/ns	同步丢失率/%
1 800	0.62	3.34	0
3 600	0.58	6.67	0
5 400	0.55	6.67	0

根据图表分析可知,当周期值和计数值发生溢出时,捕获的数据进入死区区间。这种情况下,需要使用延迟捕获的技术来准确获取数据再进行后续计算,经过这种方法计算得到的数据与实际捕获的数据之间的同步误差在 10 ns 以内,这一结果充分表明延迟修正方法算法在误差控制方面的有效性,验证了数据的高精度同步,满足对实时数据处理和分析的严格要求。

#### 4.2 守时验证

对断开北斗天线后本系统守时 1 h 的信号与未断开时进行对比,实验开始时,系统运行 1 h 以收集基础数据校准原子钟。随后断开北斗天线以观察信号的后续变化。在此期间,系统持续执行守时输出,经过一小时的运行后记录了断开后的信号变化情况。对比图如图 11 所示,信号 1 表示北斗系统的 1PPS 上升沿,信号 2 表示 ARM 系统的守时 1PPS 上升沿,图中的时间显示精度为 100 ns/div,通过对比分析前后的变化信号,由图 11 可知,系统的单位小时守时误差约为 60 ns,其精度优于文献[16]所提出的方法。

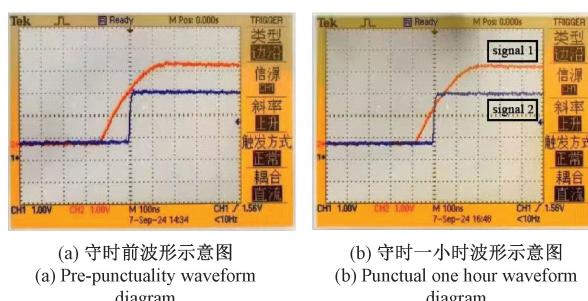


图 11 基于北斗的守时波形变化示意图

Fig.11 The punctuality waveform change diagram based on Beidou

## 5 结论

本文对基于 ARM 架构的北斗 1PPS 同步守时系统进行研究。研究的核心在于解决了 ARM 单核在北斗卫星时间同步系统调度过程中容易导致资源竞争和实时响应偏差的问题。结果表明,在同步过程中,系统的时间误差控制在 10 ns 以内;在守时过程中,单位小时的时间误差控制

在 100 ns 以内。此结果验证了该方案在实现高精度时间同步和守时的有效性和稳定性。

## 参考文献

- [1] 刘洋,李冒金.FPGA 与北斗的高精度时差信息获取系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(7):59-61.
- [2] LIU Y, LI M J. Design of high-precision time difference information acquisition system based on FPGA and Beidou[J]. SCM and Embedded System Application,2022, 22(7):59-61.
- [3] 陈瑞琼,卢建福,刘娅,等.一种基于 GNSS 卫星共视的标准时间复现终端研制[J].电子测量技术,2021,44(6):143-148.
- [4] CHEN R Q, LU J F, LIU Y, et al. Development of a standard time recurring terminal based on GNSS satellite common-view [J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(6):143-148.
- [5] 孙宇嘉,于纪言,王晓鸣.自适应温度补偿无线传感器网络时间同步方法[J].仪器仪表学报,2019,40(1):132-141.
- [6] SUN Y J, YU J Y, WANG X M. Adaptive temperature compensation time synchronization method for wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 ( 1 ): 132-141.
- [7] 汤雪乾,李峭.时间触发以太网分布式时钟同步一致性研究[J].电子测量技术,2019,42(21):127-130.
- [8] TANG X Q, LI Q. Research on distributed agreement of clock synchronization of time-triggered ethernet[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 ( 21 ): 127-130.
- [9] 王延年,宋小伟.高精度时钟同步系统的研究与实现策略[J].国外电子测量技术,2018,37(3):30-33.
- [10] WANG Y N, SONG X W. Research and implementation strategy of high precision clock synchronization system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018,37(3):30-33.
- [11] 何波,魏智,纪立,等.面向成本优化的高精度时间服务系统研究与实现[J].电子测量技术,2020,43(20):178-182.
- [12] HE B, WEI ZH, JI L, et al. Research and implementation of time service system for cost optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(20):178-182.
- [13] LI Y, YIN ZH Y, MA Y, et al. A time synchronization method based on clustering algorithm for industrial time-sensitive networks[C]. 2023 15th International Conference on Communication Software and Networks(ICCSN), 2023: 238-242.
- [14] 卢韦明.基于北斗的网络时间同步服务器设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [15] LU W M. Design and implementation of network time synchronization server based on Beidou [D]. Xi'an Jiaotong University, 2019.

- [9] 罗峰,徐金鹏.基于车载环境的时间同步协议优化[J].  
仪器仪表学报,2019,40(2):96-104.
- LUO F, XU J P. Time synchronization protocol optimization for automotive environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 96-104.
- [10] WANG J X, CUI J ZH, WANG SH W, et al. Design of a cesium atomic clock 1PPS signal generation and synchronization module based on FPGA [C]. 2020 International Workshop on Electronic Communication and Artificial Intelligence(IWECAI), 2020:46-50.
- [11] 师伟国.多路同步用北斗接口 FPGA 算法及实现[D].  
西安:西安工业大学,2023.
- SHI W G. FPGA Algorithm and implementation of Beidou Interface for Multichannel synchronization[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [12] 王蕾,李淑婧,刘萍妮,等.一种基于嵌入式的高精度同步授时系统[J].现代电子技术,2023,46(6):7-10.  
WANG L, LI SH J, LIU P N, et al. A high-precision synchronous timing system based on embedded system[J]. Journal of Modern Electronic Technology, 2023, 46(6): 7-10.
- [13] 陈雨锋,王波.光纤时间频率同步技术及应用[J].  
仪器仪表学报,2024,45(2):47-62.  
CHEN Y F, WANG B. Fiber-optic time and frequency synchronization technology and its applications [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 47-62.
- [14] 朱庆豹,施伟斌.基于 TDMA 技术的无线传感器网络时间同步新方法[J].电子测量技术,2019,42(3):  
135-139.  
ZHU Q B, SHI W B. New method of time synchronization for wireless sensor network using TDMA technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(3): 135-139.
- [15] 程顺岭,李常贤,赵科.基于 PTP 协议的列车通信网络时间同步优化研究[J].电子测量技术,2022,45(18):  
91-98.  
CHENG SH L, LI CH X, ZHAO K. Research on time synchronization optimization of train communication network based on PTP protocol [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(18): 91-98.
- [16] 罗显翔.基于北斗秒脉冲的本地守时模块设计与实现[D].成都:电子科技大学,2023.  
LUO X X. Design and realization of local timing template based on Beidou second pulse[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [17] QI ZH, WANG X, LIU Q, et al. Research on processing method of low-frequency time-code 1PPS based on Kalman filter [C]. 2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), 2022:  
134-137.
- [18] 杨帆.基于北斗系统的嵌入式时钟同步技术及安全性分析研究[D].天津:天津理工大学,2024.
- YANG F. Research on embedded clock synchronization technology and security analysis based on Beidou system[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024.
- [19] 徐荣,赵金峰,田湘,等.北斗高精度时间同步技术方案[J].导航定位学报,2023,11(1):154-158.  
XU R, ZHAO J F, TIAN X, et al. Scheme of Beidou high-precision time synchronization technology [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11 (1): 154-158.
- [20] 戎强,尹继凯,王彬.北斗授时时统零值标定技术研究[J].现代导航,2022,13(5):313-318.  
RONG Q, YIN J K, WANG B. Study on zero-value calibration technology of Beidou timing system [J]. Modern Navigation, 2022, 13(5): 313-318.
- [21] 朱琳,张慧君,李孝辉,等.北斗/GNSS 授时性能评估及结果比较分析[J].时间频率学报,2023,46(4):  
289-297.  
ZHU L, ZHANG H J, LI X H, et al. Performance assessment and results comparison of BDS/GNSS timing [J]. Journal of Time and Frequency, 2023, 46(4): 289-297.
- [22] 李志伟,侯敏杰.基于滑动窗口的混合属性大数据聚类算法[J].信息与电脑(理论版),2024,36(5):49-52.  
LI ZH W, HOU M J. Clustering algorithm of mixed attribute big data based on sliding window [J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2019, 36(5): 49-52.
- [23] 马明娟,张万龙.线性最小二乘法拟合讨论[J].数学学习与研究,2022(30):137-139.  
MA M Y, ZHANG W L. Discussion on linear least square fitting [J]. Mathematics Learning and Research, 2022(30): 137-139.
- [24] 左朝阳.基于北斗授时的时钟驯服与保持系统研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.  
ZUO CH Y. Research on clock taming and keeping system based on Beidou timing [D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [25] 左兆辉,王铮,刘铁强.基于铷原子钟的高精度守时技术[J].集成电路与嵌入式系统,2024,24(2):70-73.  
ZUO ZH H, WANG ZH, LIU T Q. High-precision time-keeping technology based on rubidium atomic clock[J]. Integrated Circuits and Embedded Systems, 2024, 24(2): 70-73.

### 作者简介

崔海青,硕士,副教授,主要研究方向为航电系统仿真与设计。

E-mail: hq cui@cauc.edu.cn

郭嘉伟,硕士研究生,主要研究方向为航空电子系统设计。

E-mail: 2929278556@qq.com

王凯(通信作者),硕士,副教授,主要研究方向为机载电子系统仿真与故障诊断。

E-mail: k-wang@cauc.edu.cn