

综合电子时间同步技术研究

卢永超 王斌翊 胡江峰 穆 阳 任俊龙

西北机电工程研究所 陕西 咸阳 721099

摘 要 为了实现采用硬件冗余的嵌入式综合电子信息系统时间同步,文中提出一种稳定时间同步模型,搭建了多节点时间同步框架。采用主端竞争的方式生成主节点时间服务器,利用模式控制法动态检测同步节点状态,服务器与各节点之间经过两次握手完成一次可靠同步流程,包括手动和自动同步两种方式,基于软件的实现方式可以部署在系统中的任意节点,无需单独的时间服务器,满足多总线的数据传输接口。经实验验证,在局域网内系统同步精度小于 1ms,相比 NTP 同步可靠性提升了 10%,单位时间内同步数量减小一半,适应 CAN、以太网和串口等数据传输方式,可完成多时间类型的同步任务,实现了综合电子信息系统的可靠时间同步。

关键词: 时间同步;综合电子;嵌入式分布系统;主端竞争;模式控制

中图法分类号 TP393

Research on Integrated Electronic Time Synchronization Technology

LU Yong-chao, WANG Bin-yi, HU Jiang-feng, MU Yang and REN Jun-long

Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang, Shaanxi 721099, China

Abstract In order to realize the time synchronization of the hardware redundancy embedded integrated electronic information system, a stable time synchronization model and a multi-node time synchronization framework are proposed in this paper. The master node time server is generated by the master-end competition, and the mode control method is used to dynamically detect the state of the working node. The server and each node complete a reliable synchronization process after two handshakes, including manual and automatic synchronization methods. The software-based implementation method can be deployed at any node in the system without the need for a separate time server, and meet the multi-bus data transmission interface. The test results have verified that the system synchronization accuracy in the LAN is less than 1ms, which is 10% higher than NTP synchronization reliability, as well as reduce the amount of synchronized data per unit time by half. It adapts to data transmission methods such as CAN, Ethernet and serial ports, and can complete synchronization of multiple time types. The method has achieve reliable time synchronization of the integrated electronic information system.

Keywords Time synchronization, Integrated electronics, Embedded distributed system, Master-end competition, Mode control

随着军事综合电子信息系统的发展,采用硬件冗余设计的嵌入式分布系统被广泛应用,因此时间同步至关重要^[1]。包含多系统的综合电子信息系统具有资源共享、数据集中、模块化管理等特点,具备高效的报文处理和计算能力。但是,由于各系统没有统一的时间基准,很难保证综合电子信息系统的时间同步^[2]。目前,常用的时间同步方式主要有 3 种^[3-4]: 基于卫星导航(Global Positioning System, GPS)的硬同步技术、IEEE1588 标准精密时间协议(Precision Time Protocol, PTP)^[5]和基于互联网授时的软同步技术(Network Time Protocol, NTP)。上述方法的对比结果如表 1 所列。

基于硬件的 GPS 和 PTP 时间同步协议需要在每个系统中部署硬件同步设备,同步精度可达微秒级以上,各个设备之间需要直连,操作复杂,成本高。而 NTP 只支持网络时间同步,没有可靠的同步保障机制^[6]。在综合电子信息系统中,传统的时间同步协议多采用周期性广播的方式来触发同步过程,数据发送频繁,时间同步依赖于时间服务器,只满足系统时间同步,未检测各个节点的同步完成状态^[8],很难满足多总线的综合电子信息系统的时间同步需求。

为了提高综合电子信息系统的同步精度,优化同步流程,保证同步过程的可靠性,本文提出一种稳定时间同步方法。稳定时间同步方法(Stable Network Time Protocol, SNTP)采用纯软件的方式,基于综合电子多总线特点满足不同的数据传输方式。在各个系统中节点的部署方式相同,不用专门设置时间服务器,利用随机同步策略触发同步任务,避免周期性数据占用传输带宽。设置手动同步模式与自动触发模式两种模式,可同步除系统时间外的其他时间类型。同步过程实时

表 1 3 种同步方式对比

Table 1 Comparison of three synchronization methods

Method	GPS/北斗	PTP	NTP
Accuracy	ns	us	ms
Cost	High	Mid	Low
Reliability	Mid	Mid	Mid
Interface	Serial port	Ethernet	Ethernet

基金项目:装备预研领域基金项目(61403120205)

This work was supported by the Equipment Pre-research Sharing Technology and Field Funds(61403120205).

通信作者:卢永超(luyongcsx@163.com)

检测各系统的状态,实现综合电子信息系统的时间同步。

1 稳定时间同步原理

通常来说,造成分布式系统时间不一致的因素有以下3点:1)时钟的抖动与漂移;2)数据传输延迟;3)数据传输上行与下行延迟存在不对称性。

对于前两点影响因素,可以通过时间同步算法来解决。稳定时间同步算法的过程如图1所示,采用同步时间和状态信号并行的方式,在保证同步效率的情况下,保证同步过程的可靠性。首先接收到同步任务的节点作为时间服务器(主节点),发送同步信号。当其他节点(从节点)收到同步信号时,发送自己请求同步信号并记录信号发送的时间 T_1 ,服务器节点收到请求同步信号后发送当前系统的时间 T_3 和同步完成信号,并保存请求同步信号到达的时间 T_2 。其他节点收到服务器的完成信号发送等待信号,并记录信号到达时间 T_4 ,根据信息交换的时间计算两地时间偏差 θ 和网络延迟 δ ,等待信号利用获得的时间偏差调整本地时钟。

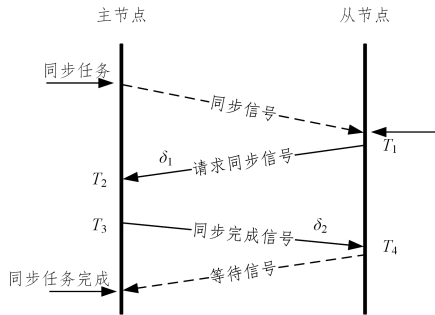


图1 时间同步过程

Fig.1 Time synchronization process

由时间同步过程可得:

$$T_2 - T_1 = \theta + \delta_1 \quad (1)$$

$$T_4 - T_3 = \delta_2 - \theta \quad (2)$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta \quad (3)$$

其中, δ_1 和 δ_2 为主从节点之间的数据传输耗时。

假设数据传输耗时相等,即 $\delta_1 = \delta_2$,联合式(1)一式(3)可得:

$$2\theta = (T_2 + T_3) - (T_1 + T_4) \quad (4)$$

$$\delta = (T_4 - T_1) - (T_3 - T_2) \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可知,该方法不仅能够计算传输延迟,而且能够独立地计算时间偏差,从而实现了分布式系统中的时间同步。上述计算方式是基于主从节点之间数据传输耗时相等上,但在实际分布式系统中,存在传输延迟不对称的情况。

基于综合电子的稳定时间同步技术设计的通用性,可以无差别地切换时间同步主节点,从而达到互同步的目的。

根据式(1)和式(2),令 θ_p 为上行延迟, $(\theta_p + \Delta_p)$ 为下行延迟,则有:

$$T_2 - T_1 = \theta_p + \delta_1 \quad (6)$$

$$T_4 - T_3 = \delta_2 - (\theta_p + \Delta_p) \quad (7)$$

当切换主节点时间服务器时,式(6)和式(7)可以改写为:

$$T_2 - T_1 = (\theta_p + \Delta_p) + \delta_1 \quad (8)$$

$$T_4 - T_3 = \delta_2 - \theta_p \quad (9)$$

联合式(6)一式(9),即可减小延迟不对称 Δ_p 带来的影响。

2 稳定时间同步技术架构

基于综合电子的稳定时间同步技术(SNTP)基于状态模式控制来设计,不预设主端(时间服务器)和从端(客户端)节点,而是靠随机同步策略来产生主端,节点互相同步,降低传输波动的影响,保证同步精度。设置多个时间同步接口,可以同时手动设置多种类型的时间进行同步,扩展了时间同步的范畴。

稳定时间同步技术方案如图2所示,初始状态下各个节点都处于等待状态。如果某一节点收到同步命令则该节点进入同步任务状态,此外,若该节点为预设对时节点,其检测到各个节点的时间不统一时(或者超出一定误差),则该节点进入同步任务状态。

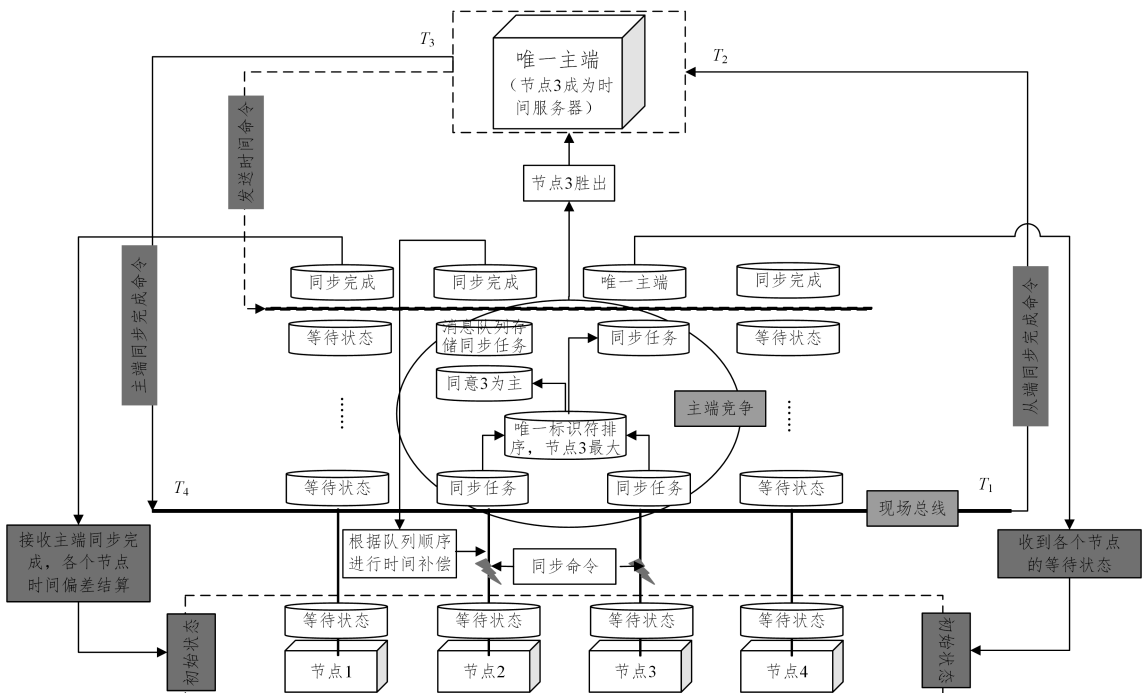


图2 稳定时间同步技术架构

Fig.2 Stable time synchronization technology architecture

在同步任务状态下的节点,主动统计其他节点的状态。当有两个以上的节点同时处于同步任务状态时,则这些节点需先进行主端竞争,选出一个节点作为唯一主端(时间服务器)执行时间同步任务。主端竞争采用“圆桌会议”模式,所有处于同步任务状态下的节点按唯一标识(设备号、网卡地址等)排序,选出标识最大的标识作为竞争胜出节点,胜出节点即唯一主端来执行同步任务,其他处于同步任务状态的节点将信息存储于消息队列中(未胜出节点相当于普通节点)。当唯一主端完成同步任务时,其他节点再进行主端竞争并重复上述过程。

产生唯一主端之后,可靠同步架构的具体流程如下:

(1)唯一主端发送时间同步信号(发送时间命令),该节点(时间服务器)处于同步任务状态。

(2)从端节点收到唯一主端的时间同步信号之后,向主端发送时间同步完成信号(从端同步完成命令),并记录该信号发送的时间 T_1 ,当前节点处于同步完成状态。

(3)唯一主端接收各个从端节点反馈的同步完成信号,并记录每个信号到达的时间 T_2 。当主端收到所有从端节点的同步完成信号时,记录当前时间为 T_3 ,同时发送主端同步完成信号(主端同步完成命令)并携带时间 T_2 和 T_3 ,唯一主端处于同步完成状态。

(4)当从端节点收到主端发出的同步完成信号时,记录当前时间为 T_4 ,发布进入等待信号,从端节点进入等待状态,计算时间偏差和网络延时。

(5)唯一主端接收各个从端节点反馈的进入等待信号。当主端收到所有从端节点的进入等待信号时,其进入等待状态,至此可靠同步流程结束。

通常,网络时间同步算法是基于节点之间网络传输耗时相等的假设,这种处理方式忽略了网络的随机拥堵,只有在理想的环境下才能获得较高的精度。采用随机主端的方式可以实现互相同步,从而降低了延时带来的影响。

3 分布式系统时间同步设计实现

设计如图3所示的分布式系统。综合电子信息系统包含3个系统。3个系统具有多种接口,包括以太网、CAN和串口,具体如图3所示。

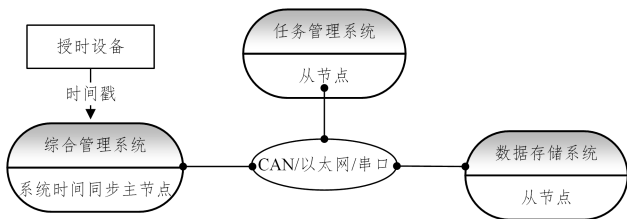


图3 分布式系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of distributed system structure

稳定时间同步旨在实现综合电子信息系统时间保持一致,部署时不区分主从节点。当某一系统接入授时设备时,该系统节点默认为系统时间同步主节点。稳定时间同步包括手动触发和系统内随机触发两种机制。手动触发机制通过发布同步命令来触发时间同步任务,可以设计多个接口,例如系统时间接口、战时时间接口和天文时间接口等;系统内随机触发机制基于主节点定时检测,当其发现各个节点的时间不一致时触发同步任务。

各个节点之间通过包含时间戳信号来交互,信号中携带

的信息的定义如下:

节点标识	时间 T_1	时间 T_2	时间 T_3	时间 T_4	信号类型	目标节点标识
------	----------	----------	----------	----------	------	--------

稳定时间同步技术采用模式控制法,对于一个节点来说,整个过程有5种模式状态:等待状态、请求同步状态、同意请求状态、发送时间状态和同步完成状态,这5种状态形成一套完整的可靠同步流程。各个状态之间通过命令切换,命令在发布时还附带包含节点的唯一标识、同步的时间类型和时间信息。以图3中的3个节点为例,假设综合管理系统为当前主节点。在等待状态中,综合管理系统负责检测同步信号和其他节点的请求同步信号。当收到同步信号时进入请求同步状态,触发同步任务;当收到请求同步信号时,发送同步完成信号并记录当前节点的时间 T_1 ,无信号时一直保持等待状态。

在请求同步状态中,当仅有一个节点有同步任务时,该节点确认自己为时间服务器并发布该节点的同步信号。假设综合管理系统和任务管理系统同时触发同步任务,则进行主端竞争。竞争规则可依据命令中携带的节点唯一标识来制定,若竞争选出综合管理系统为胜出的节点,则该节点为唯一主端(时间服务器)。未胜出的任务管理系统将同步信号存储于消息队列中,当唯一主端完成同步流程时,再经过竞争进行同步过程。此外,任务管理系统还需发布同步请求信号,并在信号中附加携带综合管理系统节点的标识,表示确认胜出节点为时间服务器。同意请求状态中唯一主端负责接收任务管理系统和数据存储系统节点发布的同意请求信号。当收到任务管理系统和数据存储系统节点发布的同意请求信号之后,唯一主端确认所有节点同意自己为时间服务器,发布同步信号。

发送时间状态下综合管理系统记录每一条任务管理系统和数据存储系统,同步完成信号到达的时间 T_2 ,当任务管理系统和数据存储系统都上报同步完成信号之后,综合管理系统发布同步完成信号,命令中携带当前时间 T_3 和相应节点信号到达的时间 T_2 ;任务管理系统和数据存储系统在收到综合管理系统的发送时间信号之后,发布同步完成信号,并记录当前时间 T_1 。

同步完成状态中,综合管理系统收到任务管理系统和数据存储系统两者的等待信号之后发布等待信号,进入等待状态,这样确保了每一个从节点都完成了时间同步过程并进入等待状态;任务管理系统和数据存储系统收到综合管理系统发出的同步完成信号时,记录信号到达的时间 T_4 ,发布等待信号。通过解析信号获得时间 T_2 和 T_3 以及读取记录的时间 T_1 和 T_4 就可以获得4个时间,即可计算出时间偏差和网络延迟。

在每个状态中,综合管理系统实时掌控任务管理系统和数据存储系统节点的状态,控制整体同步流程,确保每个节点同步完成。利用标识区别来源可以应对任意节点损坏或者节点增加等情况。

4 SNTP性能测试与对比

4.1 性能测试

设计如4所示的信息系统节点1和节点2。图4中包含一个电源模块和两个节点,节点1为综合信息处理模块,节点2为存储模块。

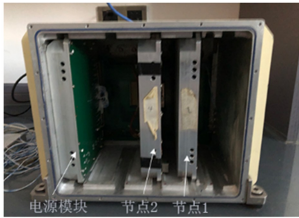


图4 信息系统组成图

Fig. 4 Information system hardware composition diagram

节点1为预设对时节点,发布同步任务。节点2反馈同步完成,系统时刻为2019-08-15 11:45:02:653.5,将时刻转为毫秒,则 T_1 为1565840702653.5ms。节点1收到同步完成,记录当前时刻2020-02-18 18:33:14:271.2,则 T_2 为1582021994271.2ms。经过1ms,节点1发送同步完成,当前时刻 T_3 为1582021994272.2ms。节点2收到同步完成,记录当前时刻为2019-08-15 11:45:02:668,则 T_4 为1565840702668.8ms。根据式(5)和式(6),计算得到时间偏差 $\theta=16181291617$ ms,网络延迟 $\delta=7.1$ ms。将节点2的系统时间加上计算得到的时间偏差便可修正时间,从而达到整个系统时间统一的目的。

为了验证本文的同步方法,基于国产平台“龙芯+Reworks”系统,部署两个节点。设置节点1为预设对时节点,统计测试系统在随机触发模式下的时间偏差。如图5所示,每3min记录一次,测试结果显示时间精度小于0.95ms。

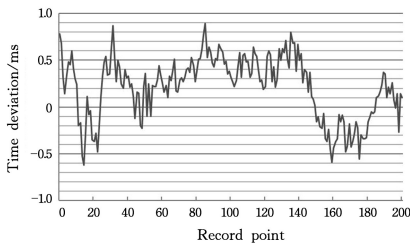


图5 时钟偏差图

Fig. 5 Clock deviation graph

4.2 其他同步协议对比

(1)通用性和扩展性对比

根据表1和图3可知,GPS、PTP和NTP支持串口或者以太网中的一种,而本文的基于综合电子的SNTP支持多种总线数据传输方式,包括CAN、以太网和串口等,方便融入各种信息系统中,避免了数据传输方式和对外接口的限制。SNTP除了可以同步系统时间外,还能完成自定义时间类型的同步,扩展了应用范围。

(2)可靠性对比

根据SNTP设计架构,时间服务器(主节点)可以实时监控其他节点的同步状态,保证了完整的同步过程,确保各个节点的时钟同步,在GPS、PTP和NTP协议中主动同步和被动同步方式都未能实现各个节点的动态监控,时间服务器只负责收发同步协议信号,不考虑节点同步过程是否完成。

在基于“龙芯+Reworks”的综合电子信息系统,设置3个节点,统计各个节点的同步完成情况,总线网络满负载运行,进行1000次同步,测试PTP、NTP和SNTP3种方式的同步效果,同步结果如表2所列。由对比结果可以看出,SNTP的平均同步率高于其他方式,体现了SNTP的可靠性。

表2 3种方式同步完成次数

Table 2 Three ways to synchronize result

Method	SNTP	PTP	NTP
Node 1	1000	951	906
Node 2	1000	943	929
Node 3	1000	937	915
Average/%	100	94.4	91.6

(3)成本对比

本文中SNTP和NTP都属于软同步技术,其精度都低于有硬件支持的GPS和PTP。

硬同步(GPS和PTP)在具有高精度的同时,成本增大。对于分布式系统来说,需要直连线缆、同步设备(包括NTP)和授时设备,当节点很多时,成本成倍增长,系统还需为同步设置预留专用接口。相比而言,对于精度要求不是很高的系统,硬件同步的方式增加了系统开发成本和设计难度,采用稳定时间同步技术这种软同步技术能够起到更好的效果。

根据图4的设计,以30s周期统计NTP和SNTP两种方式的同步数据。以min为单位,统计的总线同步数据包如表3所列。由表3可知,SNTP降低了总线带宽的占用率。

表3 占用带宽统计

Table 3 Synchronization occupied bandwidth

Method	SNTP	NTP
AverageData packet	2	6

结束语 本文设计了一种新型基于综合电子信息系统的稳定时间同步架构,在保证系统时间一致的同时提高了可靠性,各个节点部署方式通用化,节省了时间服务器等硬件成本。经过实验验证,局域网精度可达1ms,兼容CAN/以太网等多总线,同步可靠且实现成本低,可扩展同步除系统时间之外的时间类型,为综合电子信息系统的推广应用奠定基础。

参考文献

- [1] 沈涛,周曼,周荣坤,等.面向服务的综合电子信息系统软件策略[J].中国电子科学研究院学报,2008,3(2):158-164.
- [2] 张卓,翟二宁,何浩.某火炮总线网络交换机时间同步软件的设计与应用[J].火炮发射与控制学报,2016,37(3):65-69.
- [3] 洪锋,张玉亮,杨博真,等.水下传感器网络时间同步技术综述[J].电子学报,2013,41(5):960-965.
- [4] 李培基,李卫,朱祥维,等.网络时间同步协议综述[J].计算机工程与应用,2019,55(3):30-38.
- [5] GUO H, CROSSLEY P. Design of a time synchronization system based on GPS and IEEE 1588 for transmission substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2091-2100
- [6] GONG G H, LI H M. High-precision time distribution based on optical ethernet [J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(6).
- [7] WANG K, HU Y H, HE Z M. Study and implementation of hardware-assisted IEEE 1588 based on DP83640 [J]. Journal of Time & Frequency, 2011, 34(1): 1-8.



LU Yong-chao, born in 1993, postgraduate. His main research interests include weapon system command and control and so on.