

文章编号:1671-251X(2021)02-0104-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020090005

矿用分布式采集系统时钟同步方案设计与实现

安赛^{1,2}



扫码移动阅读

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

摘要:单一的时钟同步技术由于其精度及应用局限性,无法满足矿用分布式采集系统高精度、高可靠性的时钟同步性能要求。针对上述问题,提出了基于北斗+IEEE 1588V2+本地后备时钟的三级协同时钟同步方案。选用部署在地面的 T600-BDGOXC 型北斗授时服务器作为主时钟,为系统提供纳秒级精度的绝对时钟;采用 STM32F407+DP83848 及 PTPd 协议栈实现支持 IEEE 1588V2 协议的采集节点,通过井下工业环网将北斗的绝对时钟同步到各采集节点;本地后备时钟采用 STM32F407 内部 RTC(实时时钟)实现,给各采集节点提供秒级精度的时间戳初值,便于各采集节点用最短时间实现与主时钟的同步。测试结果表明,北斗授时服务器与采集节点通过交换机直连的情况下,1 min 后时钟同步精度达 162 ns;北斗授时服务器与采集节点通过三级交换机连接的情况下,时钟同步精度为 565 ns;在北斗授时服务器失效的情况下,优先级高的采集节点升级为主时钟并为其余采集节点授时,具有较强的可靠性。

关键词:矿用分布式采集系统;时钟同步;北斗;IEEE 1588V2;本地后备时钟

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Design and implementation of clock synchronization scheme for mine distributed acquisition system

AN Sai^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch, CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: Due to its accuracy and application limitations, single clock synchronization technology can not meet the high-precision and high-reliability clock synchronization accuracy requirements of the mine distributed acquisition system. In order to solve the above problems, a three-level coordinated clock synchronization scheme based on Beidou + IEEE 1588V2 + local backup clock is proposed. The T600-BDGOXC Beidou timing server is selected to be deployed on the ground as the master clock to provide absolute clock with nanosecond precision for the system. The STM32F407+DP83848 and PTPd protocol stack are used to implement the acquisition nodes that support IEEE 1588V2 protocol. The absolute clock of Beidou is synchronized to each acquisition node through the mine ring network. The local backup clock is implemented by using the STM32F407 internal RTC (Real-time Clock), which provides each acquisition node with time stamp initial value with second-level precision, so that each acquisition node can synchronize with the master clock in the shortest time. The test results show that the clock synchronization precision is 162 ns after 1 min when the Beidou timing server and the acquisition nodes are directly connected through the switch. The clock synchronization precision is 565 ns when the Beidou timing server and the acquisition nodes are connected through the three-level switch. When the Beidou

收稿日期:2020-09-04;修回日期:2021-02-08;责任编辑:盛男。
基金项目:煤科院科技发展基金项目(2020CX-II-14)。
作者简介:安赛(1987—),男,河北保定人,助理研究员,硕士,主要从事煤矿动力灾害监测预警设备研发工作,E-mail:670405696@qq.com。
引用格式:安赛. 矿用分布式采集系统时钟同步方案设计与实现[J]. 工矿自动化,2021,47(2):104-108.
AN Sai. Design and implementation of clock synchronization scheme for mine distributed acquisition system[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(2):104-108.

timing server fails, the acquisition node with high priority is upgraded to be the master clock and provides timing for the remaining acquisition nodes with strong reliability.

Key words: mine distributed acquisition system; clock synchronization; Beidou; IEEE 1588V2; local backup clock

0 引言

随着人工智能、物联网、云计算、大数据等技术在矿山的快速应用与发展,越来越多的矿用分布式采集系统接入矿用工业环网,为矿山的安全生产、管理决策提供了重要的数据支撑与基础保障^[1-3]。矿用分布式采集系统的时钟同步是其正常运行的关键^[4],实现统一的时间基准是后续数据处理的前提。

目前,常用的时钟同步技术有北斗^[5-6]、GPS、NTP(Network Time Protocol,网络时间协议)^[7-8]、IEEE 1588V2^[9-11]、本地后备时钟和同步线^[12]等,见表1。北斗及GPS均是通过天线接收卫星信号获取纳秒级精度的绝对时钟及经纬度、海拔高度信息,可提供时钟秒脉冲、串口ACSII码时间报文、IRIG-B码等格式的时间信息,但需要部署在能接收到卫星信号的场所,无法直接应用于井下;NTP采用简单网络协议为局域网、广域网设备提供毫秒级的时钟同步精度;IEEE 1588V2采用网络对称性及延时测量技术实现主从时钟同步,具有数据帧少、算法简单、移植方便等特点,可提供纳秒级的时钟同步精度;本地后备时钟能够以极低的成本为本地设备提供秒级的时钟同步精度;同步线方式需要单独布置信号线,其时钟同步精度与线缆的长度、分布电容、分布电阻有关。

表1 常用的时钟同步技术

Table 1 Common clock synchronization technologies						
类别	精度	卫星覆盖	使用成本	以太网	安全性	可靠性
GPS	20 ns	需要	中	不支持	低	中
北斗	20 ns	需要	中	不支持	高	中
NTP	10 ms	不需要	低	支持	低	高
IEEE 1588V2	100 ns	不需要	低	支持	中	高
本地后备时钟	1 s	不需要	极低	不支持	高	低
同步线	1 μs	不需要	高	不支持	中	低

单一的时钟同步技术由于其精度及应用局限性,无法满足矿用分布式采集系统高精度、高可靠性的时钟同步性能要求。根据矿用分布式采集系统架构特点,本文提出了基于北斗+IEEE 1588V2+本地后备时钟的三级协同时钟同步方案。北斗为整个

系统提供高精度绝对时钟,系统中各采集节点通过IEEE 1588V2协议及本地后备时钟与北斗保持时钟同步。

1 时钟同步方案设计

矿用分布式采集系统时钟同步方案原理如图1所示。北斗授时服务器接收北斗系统提供的纳秒级精度的绝对时钟,并作为主时钟通过井下环网为所有采集节点授时;各采集节点软件实现IEEE 1588V2协议,接收主时钟的授时进而调整本地的64位时间戳寄存器;本地后备时钟为各采集节点提供秒级精度的时间戳初值,便于各采集节点以最短时间实现与北斗授时服务器的同步。

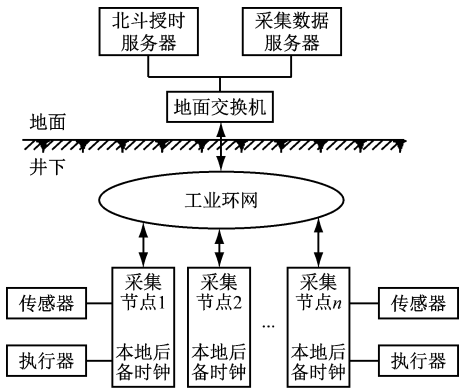


图1 矿用分布式采集系统时钟同步方案原理

Fig.1 Principle of clock synchronization scherne for mine distributed acquisition system

该方案能兼容矿用分布式采集系统硬件架构,适用性强;只需要额外部署1台北斗授时服务器作为主时钟,同时采集节点软件移植IEEE 1588V2协议,无需其他硬件投入,成本低;北斗授时服务器由于不可控因素失效后,只要井下工业环网与采集节点能够正常运行,IEEE 1588V2会按照最佳主时钟(Best Master Clock,BMC)算法设置1台优先级最高的采集节点作为主时钟,其他采集节点作为从时钟依然与主时钟保持时钟同步,鲁棒性强。

2 时钟同步方案实现

2.1 硬件实现

北斗授时服务器为地面设备,不需要考虑防爆问题,因此选用T600-BDGOCXC工业用授时服务器,该服务器支持IEEE 1588V2协议。采集节点时钟同步硬件部分采用STM32F407+DP83848实

现,如图 2 所示。STM32F407 内部集成以太网 MAC 接口的时间戳单元,硬件支持 IEEE 1588V2 协议,使用 MII 网络接口连接 PHY 芯片 DP83848。本地后备时钟采用 STM32F407 内部 RTC(Real-time Clock,实时时钟)实现,使用后备纽扣电池防止掉电后 RTC 丢失时间信息。

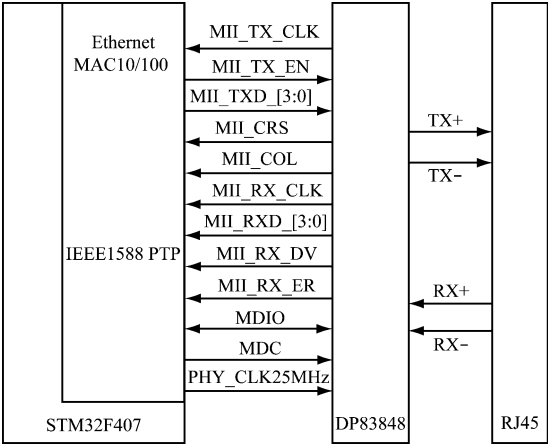


图 2 采集节点时钟同步硬件电路

Fig. 2 Hardware circuit of clock synchronization in acquisition node

2.2 软件实现

IEEE 1588V2 协议的移植与实现是矿用分布式采集系统时钟同步方案的核心。该协议实现时钟同步的原理^[13-16]如图 3 所示。

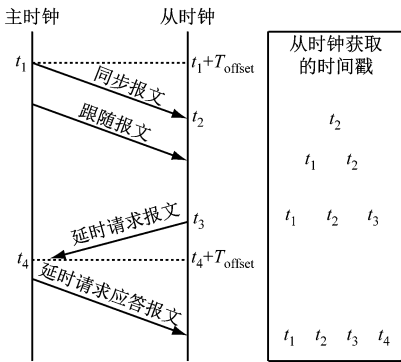


图 3 IEEE 1588V2 时钟同步原理

Fig. 3 Principle of IEEE 1588V2 clock synchronization

(1) 根据定义的时钟间隔,北斗授时服务器(主时钟)周期性地给采集节点(从时钟)发送同步报文,并且记录同步报文发送时刻为 t_1 ,随后将时间戳 t_1 与跟随报文打包发送给采集节点。采集节点收到北斗授时服务器发送的同步报文后,记录收到报文的时刻为 t_2 。

(2) 采集节点收到跟随报文后,解析并记录报文中携带的时间戳 t_1 ,随后向北斗授时服务器发送延时请求报文,并记录延时请求报文发送时刻为 t_3 。北斗授时服务器收到延时请求报文并记录收到报文的时刻为 t_4 ,然后将时间戳 t_4 打包通过延时请求应答报文发送给采集节点。

(3) 采集节点根据时间偏差 $T_{\text{offset}} = (t_2 - t_1 + t_3 - t_4)/2$ 和传输延迟 $T_{\text{delay}} = (t_2 - t_1 + t_4 - t_3)/2$ 更新 64 位时间戳寄存器。每次上电时,将本地后备时钟的时间信息写入时间戳寄存器,以便采集节点用最短时间实现与主时钟的同步。

基于 IEEE1588 V2 协议的采集节点软件架构如图 4 所示。操作系统层使用 RTX-V4.73 实现实时多任务调度处理;固件使用 STM32 官方函数库 V3.5 版;网络协议栈使用 LWIP-1.4.1 提供基于 UDP 的网络协议处理;IEEE 1588V2 基于 PTPd-2.0.0 开源协议栈实现;应用层实现系统初始化操作和各业务逻辑处理。

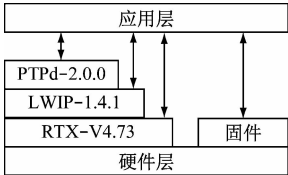
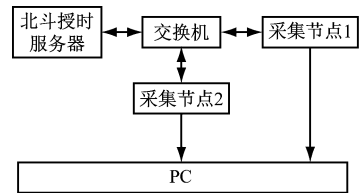


图 4 采集节点软件架构

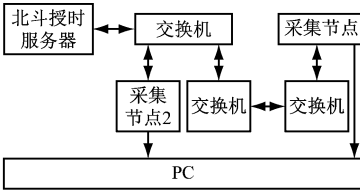
Fig. 4 Software architecture of acquisition node

3 测试验证

时钟同步测试方案如图 5 所示。每隔 2 s 将各采集节点的主从状态、时间偏差 T_{offset} 等参数通过串口发送至 PC,便于后期统计分析。



(a) 测试方案①



(b) 测试方案②

图 5 时钟同步测试方案

Fig. 5 Clock synchronization test schemes

(1) 测试方案①模拟北斗授时服务器与采集节点通过交换机直连的情况。开启采集节点 1 的本地后备时钟,采集节点 1 上电 1 min 后时间偏差统计结果如图 6 所示。可看出时钟同步精度 $\leq 162 \text{ ns}$; $|T_{\text{offset}}| \leq 25 \text{ ns}$ 的次数为 365, $|T_{\text{offset}}| \leq 50 \text{ ns}$ 的次数为 652。关闭采集节点 1 的本地后备时钟,上电后约需 10 min 达到 162 ns 的时钟同步精度,表明采用本地后备时钟可降低采集节点初次同步所需时间。

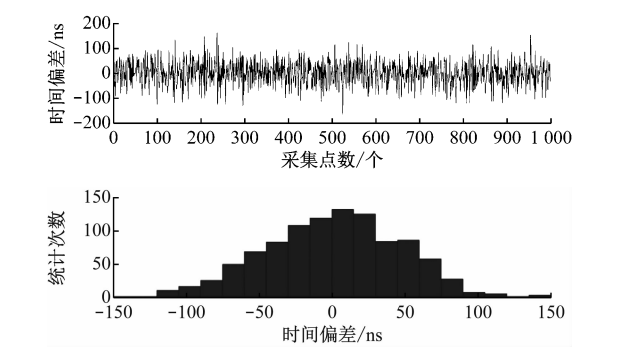


图6 方案①测试结果

Fig. 6 Test results of the first scheme

(2) 测试方案②模拟北斗授时服务器与采集节点1通过三级交换机连接的情况。采集节点1的时间偏差统计结果如图7所示。可看出时钟同步精度 $\leq 565\text{ ns}$; $|T_{\text{offset}}| \leq 25\text{ ns}$ 的次数为97, $|T_{\text{offset}}| \leq 50\text{ ns}$ 的次数为198。

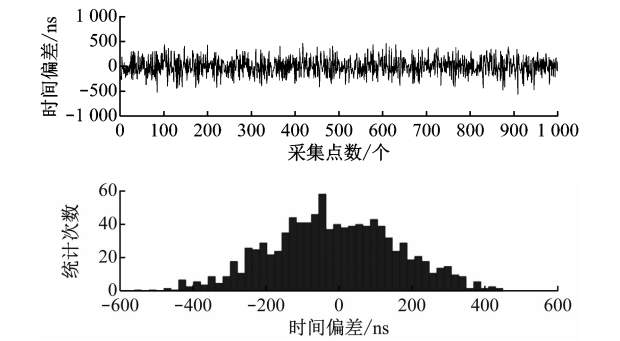


图7 方案②测试结果

Fig. 7 Test results of the second scheme

(3) 在测试方案②情况下断开北斗授时服务器与交换机的网线,模拟北斗授时服务器失效的情况。采集节点2运行状态如图8所示(fcaf6afffe00230f、0080e1fffe373655分别为北斗授时服务器、采集节点2的时钟id)。断开网线后,采集节点2状态由slave(从时钟)更改为master(主时钟),master id由北斗授时服务器的id更改为采集节点2的id。

master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 92 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 67 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 67 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 67 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 67 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 10 518 ns	state: slave	offset: 67 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: master	offset: 0 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: master	offset: 0 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: master	offset: 0 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: master	offset: 0 ns

图8 采集节点2运行状态

Fig. 8 Running status of acquisition node 2

采集节点1运行状态如图9所示(0080e1fffe373659为采集节点1的时钟id)。断开网线瞬间,采集节点1状态由slave(从时钟)变为master(主时钟);经过3个周期后,采集节点1状态恢复并保持为slave(从时钟);优先级高的采集节点2升级为主时钟继续为采集节点1授时。

master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 31 146 ns	state: slave	offset: 162 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 31 146 ns	state: slave	offset: 162 ns
master id: fcaf6afffe00230f	path delay: 31 146 ns	state: slave	offset: 162 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: master	offset: 0 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: uncalibrated	offset: 129 391 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: uncalibrated	offset: 81 425 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: uncalibrated	offset: 31 154 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: slave	offset: 8 349 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: slave	offset: 5 686 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 0	ns state: slave	offset: 8 555 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 30 295 ns	ns state: slave	offset: 5 660 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 30 295 ns	ns state: slave	offset: 6 195 ns
master id: 0080e1fffe373655	path delay: 30 295 ns	ns state: slave	offset: 5 089 ns

图9 采集节点1运行状态

Fig. 9 Running status of acquisition node 1

4 结语

为了提高矿用分布式采集系统时钟同步精度和可靠性,提出了基于北斗+IEEE 1588V2+本地后备时钟的三级协同时钟同步方案。北斗授时服务器部署在地面,作为主时钟提供纳秒级精度的绝对时钟;通过IEEE 1588V2将北斗的绝对时钟同步到各采集节点;本地后备时钟给各采集节点提供秒级精度的时间戳初值,便于各采集节点用最短时间实现与主时钟的同步。测试结果表明:北斗授时服务器与采集节点通过交换机直连的情况下,1 min后时钟同步精度达162 ns;北斗授时服务器与采集节点通过三级交换机连接的情况下,时钟同步精度为565 ns;在北斗授时服务器失效的情况下,优先级高的采集节点升级为主时钟并为其余采集节点授时,具有较强的可靠性。

参考文献(References):

[1] 周健. 基于PTPv2的分布式测量系统高精度时钟同步设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
ZHOU Jian. High precision clock synchronization design of distributed measurement system based on PTPv2[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[2] 王旭, 陈晔, 郑宾. 基于ARM的分布式测试系统时钟同步研究及实现[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 97-102.
WANG Xu, CHEN Ye, ZHENG Bin. Research and implementation of clock synchronization in distributed testing system based on ARM [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(11): 97-102.

[3] 古方奎, 林何平. IEEE 1588V2时间同步网部署方案及应用场景的分析[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(1): 66-70.
GU Fangkui, LIN Heping. Analysis of the deployment scheme and application scenario of the time synchronization network of IEEE 1588V2 [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2020, 33(1): 66-70.

[4] 张辉. 煤矿微震监测系统高精度时间同步的实现[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(增刊2): 300-302.

- ZHANG Hui. Realization on high precision time synchronization of mine microseismic monitoring system[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41 (S2):300-302.
- [5] 岳富占, 孟斌, 周中华, 等. 北斗在民用航空器领域的应用和发展[J]. 卫星应用, 2020(7):17-21.
- YUE Fuzhan, MENG Bin, ZHOU Zhonghua, et al. Application and development of Beidou in civil aircraft field[J]. Satellite Application, 2020(7):17-21.
- [6] 许其凤. 北斗系统的特点与产业优势[J]. 中国工业和信息化, 2020(7):52-58.
- XU Qifeng. Characteristics and industrial advantages of Beidou system[J]. China Industry and Information Technology, 2020(7):52-58.
- [7] 陈希, 滕玲, 高强, 等. NTP 和 PTP 协议的时间同步误差分析[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(3):35-40.
- CHEN Xi, TENG Ling, GAO Qiang, et al. Error analysis of time synchronization in NTP and PTP[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(3):35-40.
- [8] 颜思淼, 万晓东. 浅谈数据采集系统的同步[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8):5-6.
- YAN Simiao, WAN Xiaodong. Discussion on synchronization of data acquisition system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(8):5-6.
- [9] 张辉. 基于 PTP 和 RTC 的煤矿微震监测系统及应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1):107-109.
- ZHANG Hui. Coal mine microseismic monitoring system based on PTP and RTC and its application[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1):107-109.
- [10] 卢华. IEEE 1588 在数据链时间同步中的优化与实现[J]. 中国新通信, 2018, 20(9):47-50.
- LU Hua. Optimization and implementation of IEEE 1588 in time synchronization of data link[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(9):47-50.
- [11] 梅军, 徐迅, 钱超, 等. 应用于配电网的时钟偏移估计的 IEEE 1588 改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9):83-89.
- MEI Jun, XU Xun, QIAN Chao, et al. An improved IEEE 1588 synchronization scheme on the clock offset estimation applied in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9):83-89.
- [12] 战裕隆, 杨佳利, 朱纪洪. 多时钟同步方案的比较与测试[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(6):38-41.
- ZHAN Yulong, YANG Jiali, ZHU Jihong. Comparison and testing of multi-clock synchronization methods[J]. Computer Measurement and Control, 2018, 26(6):38-41.
- [13] 张佳宁, 马龙华, 杨军. IEEE 1588 协议在分布式声学测量中的应用研究[J]. 网络新媒体技术, 2016, 5(3):17-21.
- ZHANG Jianing, MA Longhua, YANG Jun. Research on the application of IEEE 1588 protocol in distributed acoustic measurement [J]. Journal of Network New Media, 2016, 5(3):17-21.
- [14] 杨中贤. IEEE 1588 精密时钟同步协议测试技术[J]. 电信网技术, 2009(2):52-57.
- YANG Zhongxian. IEEE 1588 precision clock synchronization protocol test technology [J]. Telecommunications Network Technology, 2009(2):52-57.
- [15] 黄盛, 卓越, 金鑫, 等. 一种自动校时的 IEEE 1588v2 精确时间同步算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(5):538-543.
- HUANG Sheng, ZHUO Yue, JIN Xin, et al. A precise time synchronization algorithm for IEEE 1588v2 based on automatic time calibration [J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5):538-543.
- [16] 郭冲, 蓝鲲, 王星来. 在箭载电气系统应用中对 IEEE 1588 同步协议的研究与改进[J]. 遥测遥控, 2018, 39(6):26-34.
- GUO Chong, LAN Kun, WANG Xinglai. Research and improvement of IEEE 1588 for rocket's electrical system application[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(6):26-34.