

基于 WR-PTP 的亚纳秒时间同步技术研究

朱望纯¹,康博¹,李恩²,钟震林²

(1.桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院,广西 桂林 541004;2.中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:电信级地面授时主要采用 IEEE 1588v2 协议,该协议在 4G 阶段尚可达到要求,但不能满足 5G 通信中某些应用的需求。为了进一步提高精度,采用基于白兔精确时间协议(WR-PTP)的时间同步技术来实现亚纳秒级同步。深入研究 WR-PTP 技术特征后,基于 WRPC-v4.2 内核研制了具有长距离传输能力的 WR-PTP 时钟模块,通过校正传输链路的不对称性,在 100 km 远程点对点光纤链路进行实验,测得时间同步偏差为 41.5 ps,时间同步精度为 -9.5 ps。

关键词:白兔精确时间协议;时间同步;亚纳秒;IEEE 1588v2 协议

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)12-0006-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and implementation of sub nanosecond time synchronization technology based on WR-PTP

ZHU Wangchun¹, KANG Bo¹, LI En², ZHONG Zhenlin²

(1.School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: IEEE 1588v2 protocol is mainly used in carrier level ground time service, which can meet the requirements in 4G phase, but can not meet the requirements of some applications of 5G communication. In order to further improve the accuracy, this paper uses time synchronization technology based on white rabbit precision time protocol (WR-PTP) to achieve sub nanosecond synchronization. In this paper, after deeply studying the technical characteristics of WR-PTP, the WR-PTP clock module with long-distance transmission capability is developed based on WRPC-v4.2 kernel. By correcting the asymmetry of the transmission link, an experiment was carried out on a 100 km long-distance point-to-point optical fiber link. The measured time synchronization deviation was 41.5 ps and the time synchronization accuracy was -9.5 ps.

Key words: white rabbit precision time protocol; time synchronization; sub nanosecond; IEEE 1588v2 protocol

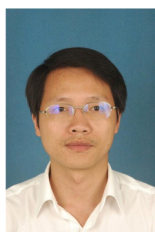
0 引言

随着 5G 通信、分布式测控、精细定位和雷达组网等应用对时间同步精度要求的不断提高,时间同步技术也正在逐步改进^[1-3]。目前,普遍应用的高精度授时技术有天基授时和地基授时,天基授时有卫星双向对比授时和全球定位系统共视,地基授时有专用授时技术和基于以太网的 IEEE 1588v2 协议等^[4-6],即精确时

收稿日期:2020-01-04。

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B010119001)资助。

作者简介:朱望纯(1976—),男,湖南双峰人,研究员,现任教于桂林电子科技大学电子工程与自动化学院,主要从事控制工程、相对导航、自动测试总线 VXI&PXI、自动测试系统与软件和虚拟仪器方面的研究工作。



间协议(PTPv2)。

由于天基授时系统中存在轨道波动、大气层温湿波动以及安全因素,在许多通信系统中会用地基授时作为其备份和替代,而专用的高精度地基授时系统兼容性和组网能力差且成本控制存在劣势,因此目前电信级地面授时主要采用 PTPv2。该协议采用交换时间戳的方法测算传输时延,时间戳精度受限于硬件时钟分辨率,虽然精度可以达到亚微秒级,在 4G 阶段尚可完成时间同步需求,但 5G 基站精细定位等新技术精度要求在 ± 10 ns 左右,PTPv2 已经无法满足需求^[10-11]。

为了弥补上述同步技术的不足之处,本文研究基于白兔精确时间协议(WR-PTP)的亚纳秒级时间同步技术^[12-16],以应对 5G 阶段的某些超高精度同步需求。

1 WR-PTP 对标准 PTP 的改进

WR-PTP 技术在网络模型和同步方法上与 PTPv2 基本一致^[12],网络节点类型包括主时钟、边界时钟和末端时钟 3 种,技术上都是采用 Sync-E 技术实现频率同步,通过交换报文时间戳来实现授时。一方面,WR-PTP 充分利用了 PTP 同步、管理以及消息机制等优秀特性;另一方面,在 PTPv2 的基础上进行了改进,核心内容包括同步实现流程改进、硬件时间戳精度提升和链路不对称时延校准。

1.1 WR-PTP 同步实现流程

WR-PTP 定义了额外的 PTP 消息、独立的 WR 状态机以及经过修改的最佳主时钟算法 (mBMC) 用来建立 WR 链路,同步实现流程^[17]如图 1 所示,可分为两步:

①WR-PTP 链路建立。在标准 PTP 同步开始之前增加了 WR 链路设置环节,以获得 WR 链路模型中同步计算所需要的数据基础,主要包括通信对象识别、SyncE 频率同步和 WR 链路参数测量以及分配等,这些都是后续计算单向传输延时和时间偏差所要求的。

②标准 PTP 同步报文。当 WR 链路建立完成,WR 主时钟设备发送 M_WR_MODE_ON 状态指示可以开始执行标准 PTP 同步。主、从时钟通过交换 PTP 报文得到 4 个时间戳 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 用于计算路径延时 μ ,如式(1)所示。

$$\mu = \frac{(t_{2p} - t_1) + (t_{4p} - t_3)}{2} \pm A_s \quad (1)$$

其中, t_{2p} 、 t_{4p} 分别表示 WR-PTP 技术对 t_2 、 t_4 这 2 个时间戳实现精度提升后的值, A_s 表示将双向路径不对称延时。

1.2 硬件时间戳精度提升

由于标准 PTP 硬件时间戳精度不足 (例如以太网收发器采用 125 MHz 时钟,时间戳分辨率只有 8 ns),

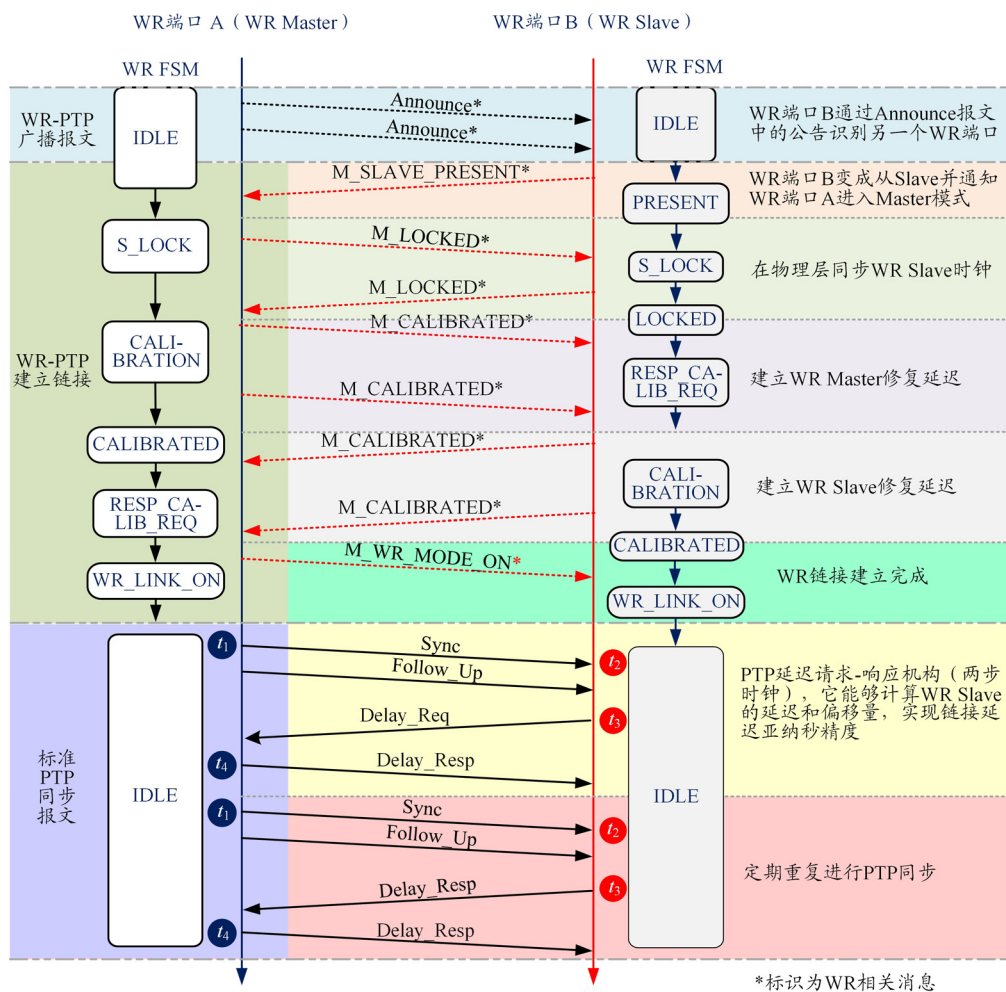


图 1 WR-PTP 同步实现流程

意味着即使算法层面最优化处理,点对点同步精度也只能达到数十纳秒级。WR-PTP 采用数字双混频鉴相器 (DDMTD) 技术对时钟信号在传输过程中产生的相位差进行检测并补偿,将硬件时间戳精度从数纳秒级提高到了皮秒级别^[18],其工作原理如图 2 所示。其中, clk_A 表示发送时钟信号, clk_B 表示环回时钟信号。

利用外部锁相环产生一个辅助时钟信号,该信号频率与被测信号 (clk_A 和 clk_B) 的频率存在微小的差别。在现场可编程门阵列 (FPGA) 内部使用该辅助时钟信号分别对 clk_A 和 clk_B 进行采样。由于采样频率非常接近被测信号的频率,所以 D 触发器会输出一个低频信号,波形图如图 3 所示。

被测信号的相位差在混频之后被线性放大 $N+1$ 倍,因此通过测量触发器输出信号的相位差可以计算出原信号的相位差:

$$p_{MM} = \frac{1}{N+1} p_{DDMTD} \quad (2)$$

其中, p_{DDMTD} 表示放大后的误差。对相位进行放大后采

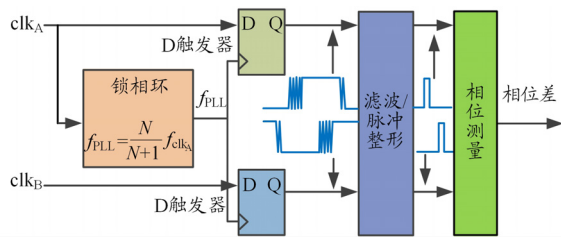


图2 DDMTD实现原理

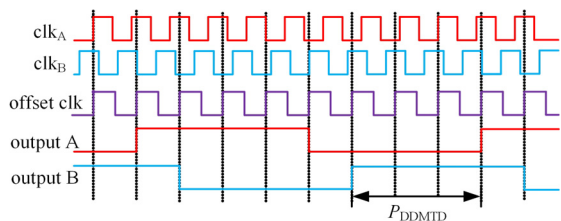


图3 全数字双混频时差测量波形示意图

用普通的计数器就可以获得很高的测量精度,如原PTP技术中计数器时钟频率为125 MHz,测量分辨率为8 ns,当 N 取16384时DDMTD的时间测量分辨率达到0.5 ps。由于被测信号和采样信号存在抖动,且当 N 值较大时采样过程中出现亚稳态的概率也会增加,因此D触发器输出信号的边沿会存在毛刺,需通过中值算法找到最佳的时钟边沿。

1.3 链路不对称时延模型分析

为了计算精确的主从时间差,必须确定链路延时的不对称性。这种不对称性不能直接测量,在测量之前需要对节点进行同步。因此,只能利用构成链路的各组件属性建立理论模型,对不对称性造成的往返延迟进行估计^[19]。

WR-PTP链路的不对称模型如图4所示,该模型主要考虑收发($\Delta_{\text{txm}}, \Delta_{\text{rxm}}$)和光纤延迟($\delta_{\text{ms}}, \delta_{\text{sm}}$),模型需

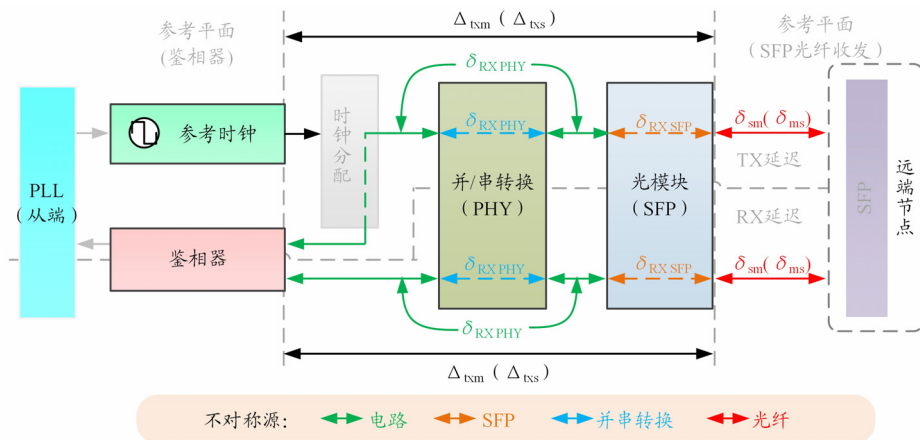


图4 WR-PTP光链路中的延时不对称模型

考虑以下不对称的来源:

①电子元件和印刷电路板(PCB)走线的传播延迟(电路不对称) $\delta_{\text{TX_CIR}}$ 和 $\delta_{\text{RX_CIR}}$;

②光收发器(SFP)不对称性 $\delta_{\text{TX_SFP}}$ 和 $\delta_{\text{RX_SFP}}$;

③在光纤传输中接收(RX)和发送(TX)之间因波长不同产生的差异 δ_{ms} 和 δ_{sm} ;

④SERDES(PHY)芯片内部结构 $\delta_{\text{TX_PHY}}$ 和 $\delta_{\text{RX_PHY}}$ 。

发送、接收链路延时计算如下:

$$\Delta_{\text{tx(m/s)}} = \delta_{\text{TX_PHY(M/S)}} + \delta_{\text{TX_CIR(M/S)}} + \delta_{\text{TX_SFP(M/S)}} \quad (3)$$

$$\Delta_{\text{rx(m/s)}} = \delta_{\text{RX_PHY(M/S)}} + \delta_{\text{RX_CIR(M/S)}} + \delta_{\text{RX_SFP(M/S)}} \quad (4)$$

其中, $\delta_{\text{TX_PHY(M/S)}}$ 和 $\delta_{\text{RX_PHY(M/S)}}$ 分别表示芯片内部发送和接收延迟, $\delta_{\text{TX_CIR(M/S)}}$ 和 $\delta_{\text{RX_CIR(M/S)}}$ 分别表示发送和接收电路走线延迟, $\delta_{\text{TX_SFP(M/S)}}$ 和 $\delta_{\text{RX_SFP(M/S)}}$ 分别表示发送和接收光纤链路延迟。电路、SFP以及SERDES(PHY)芯片内部结构的收发不对称性属于设备内部不对称延时,该部分可在设备出厂前一次性校准。在光纤传输中,WR使用单光纤双向传输,采用不同的波长来发送和接收数据(例如1550/1310 nm),由于光纤色散,这些波长的折射率(n_{1550}, n_{1310})略有不同,导致主从之间的传播速度不同,通过计算光纤介质不对称系数 α ,可实现与光纤长度无关的不对称自动校准。 α 的计算如下:

$$\alpha = \frac{\delta_{\text{ms}}}{\delta_{\text{sm}}} - 1 = \frac{n_{1550}}{n_{1310}} - 1 \quad (5)$$

其中, δ_{ms} 和 δ_{sm} 分别表示光纤的主从和从主链路延迟。

2 WR-PTP 节点时钟模型实现

WR-PTP与标准PTP一样,是一个开源项目,内核源码对所有人开放,并且由世界各国的工程师共同维护和推进,其设计初衷是实现10 km范围内的高精度时间同步。本文基于WRPC-v4.2(White Rabbit PTP

Core)内核^[16],根据实际应用需要定制外围硬件系统、FPGA系统和嵌入式系统,开发了具有长距离同步能力的节点时钟模块。WR-PTP节点时钟模型的核心系统实现如图5所示,具体组成如下:

◆外围硬件系统主要包括时钟处理、外部存储器(EEPROM和Flash)、温度传感器和SFP光收发等各种接口电路以及电源供电系统。

◆FPGA系统采用VHDL语

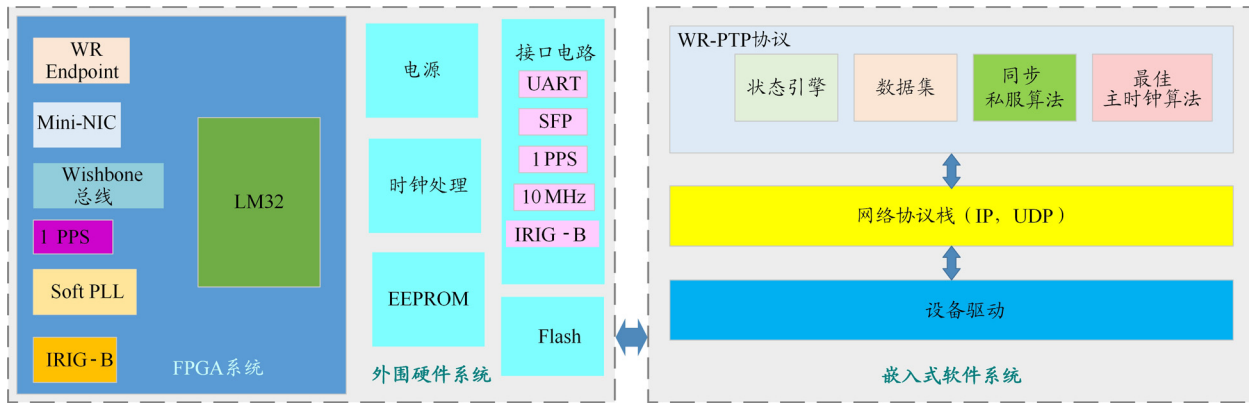


图 5 WR-PTP 节点时钟模型核心系统

言设计,主要包括 Wishbone 总线、LatticeMicro32 软核处理器(LM32)、MAC 层实现(WR Endpoint)、网络接口控制器(Mini-NIC)、软锁相环(Soft PLL)、1 PPS 发生器、IRIG-B 时间编码器以及 UART 接口模块等。

◆嵌入式软件系统设计主要包括底层设备驱动程序、中间层通用函数封装以及 WR-PTP 协议软件。嵌入式软件基于软核处理器 LM32 进行开发,采用无操作系统的软件设计方案。

3 WR-PTP 时间同步实验

本文利用研制的 WT-PTP 节点时钟模块搭建 100 km 时间同步系统如图 6 所示,并对该系统进行了性能测试。系统组成包括 WT-PTP 节点时钟模块、全球定位系统(GPS)接收机、数据时间(TOD)解码显示器、测试仪器和 100 km 光纤。WT-PTP 节点时钟模块采用 1.25 Gb/s、1550/1490 nm 的 SFP 光电收发模块,该模块无需借助外部光器件即可实现单纤双向传输。

在进行时间同步性能测试前,首先需要遵循 WR

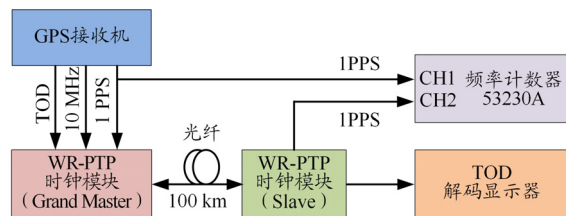


图 6 100 km WR-PTP 时间同步系统

校准流程对硬件模块进行不对称性校准和光纤不对称系数 α 的测定^[20],并且将校准参数写入配置文件中。

硬件不对称性参数固定部分在设备研制完成后可一次性测量校准,抖动部分是由于以太网数据接收时比特滑动造成的,系统每次启动时设备自动测量并

进行补偿。光纤不对称系数 α 的标定可通过短光纤与长光纤 2 组实验进行测量并计算完成,实验数据如表 1 所示。

表 1 长/短光纤对比实验数据

序号	光纤长度	环回总延时 d_{MM}	主时钟硬件 滑动延时 ϵ_M	从时钟硬件 滑动延时 ϵ_S	1 PPS 相位差 s_{PPS}
实验 1	2 m	680071 ps	4000 ps	5600 ps	49 ps
实验 2	2 m+100 km	989712375 ps	5600 ps	0 ps	51203 ps

通过测量数据计算得到光纤介质传输延时 δ 为:

$$d'_{MM1} = d_{MM1} - \epsilon_{M1} - \epsilon_{s1} = 680071 - 4000 - 5600 = 670471 (\text{ps}) \quad (6)$$

$$d'_{MM2} = d_{MM2} - \epsilon_{M2} - \epsilon_{s2} = 989712375 - 5600 - 0 = 989706775 (\text{ps}) \quad (7)$$

$$\delta = d'_{MM2} - d'_{MM1} = 989706775 - 670471 = 989036304 (\text{ps}) \quad (8)$$

校准完成后,开始进行时间同步实验;GPS 接收机接收卫星授时信号,实现与协调时间(UTC)同步;将其中一个 WR-PTP 时钟模块设置为 Grand Master 模式,并从 GPS 接收机接入时频信号;将另一个 WR-PTP 时钟模块设置为 Slave 模式;将 GPS 接收输出的 1 PPS 信号和 Slave 节点输出的 1 PPS 信号分别接到频率计数器的 CH1 和 CH2,测量二者的相位差;将 Slave 节点输出的 TOD 信号接到 TOD 解码显示模块。

系统上电后,可观察到 TOD 解码器显示的时间迅速跟踪到 GPS 接收机的时间,等待 20~30 s 后,Slave 节点输出的 1 PPS 相位也锁定到 GPS 接收机的 1 PPS 相位。本文对系统进行了连续 24 h 的测试,用频率计数器记录了 86400 个同步误差样点,统计结果如图 7 所示。可以看出,同步误差在 -50~250 ps 范围内,总体

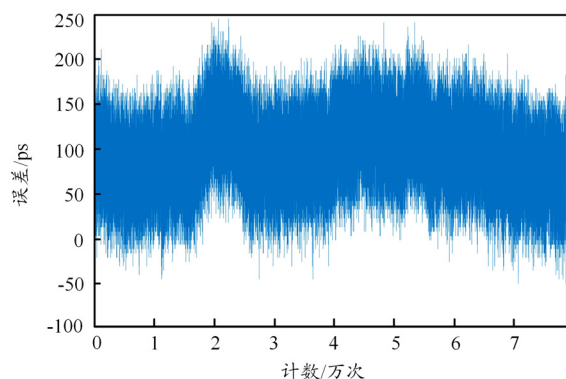


图7 100 km WR-PTP 时间同步误差统计

较为平稳,没有较大的波动。误差数据概率密度分布情况如图8所示,符合正态分布。经过高斯拟合和统计分析得出同步误差数据的均值、最大值、最小值、标准差和峰峰值分别为-9.5 ps、157.3 ps、145.0 ps、41.5 ps和302.3 ps。

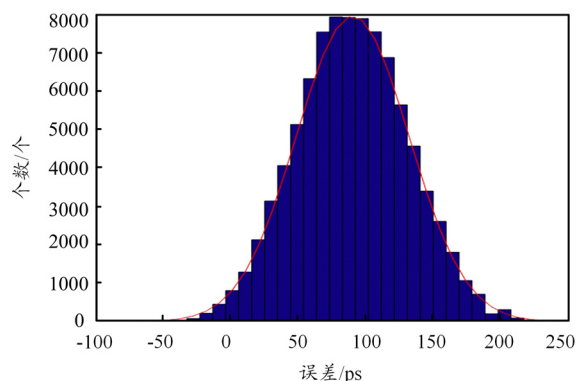


图8 100 km WR-PTP 时间同步误差概率分布统计

4 结束语

本文研究分析了WR-PTP的技术特征,基于开源WR内核WPRC-v4.2,采用FPGA和极少的外围电路研制了具有长距离授时能力的WR-PTP节点时钟模块,通过点对点连接测定光纤波长不对称系数 α 之后,搭建100 km光纤时间同步系统,验证了其长距离同步性能。WR-PTP技术的发展同时专注于网络化、标准化,基于以太网技术,在保证亚纳秒同步精度的同时兼容数据交换和传输的技术具有较好的成本优势。

参考文献:

[1] DU Q, GONG G, PAN W. A packet-based precise timing and synchronous DAQ network for the LHAASO project [J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 2013, 732(5): 488-492.

[2] 王悦,林泳泽. 面向5G的高精度时间同步网演进策略[J]. 电信技术, 2017(8):55-57.

[3] 牟宗磊,宋萍. 分布式测试系统时间同步技术的研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(5): 21-25.

[4] ZHANG Q, DING J. Design of IEEE1588 power precise time synchronization system[C]// International conference on artificial intelligence, control and automation engineering (AICAE2019), January 20-21, 2019, Wuhan, China. Beijing: China academic journal electronic publishing house, 2019: 191-197.

[5] 庾智兰,李智. 精确时钟同步协议最佳主时钟算法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 74-77.

[6] 华宇,郭伟,燕保荣,等. 我国授时服务体系发展现状分析[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 193-201.

[10] 杨旭海. 基于北斗地基增强系统的精密授时方法研究 [C]// 中国天文学会2014年学术年会, 2014年10月27-29日, 中国西安. 南京: 中国天文学会, 2014: 47-47.

[11] 陈锦成. 5G传送网方案和关键技术研究 [J]. 通信技术, 2019, 52(10): 2410-2415.

[12] SERRANO J, ALVAREZ P, CATTIN M, et al. The White Rabbit project [C]// International conference on accelerator and large experimental physics control systems (ICALEPCS2009), October 12-16, 2009, Kobe, Japan. Geneva: European organization for nuclear research, 2009: 93-95.

[13] YUAN X, WANG B. Using single wavelength light to improve the synchronization accuracy of the White Rabbit system [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 65-69.

[14] DIERIKX E, WALLIN A, FORDELL T, et al. White Rabbit precision time protocol on long distance fiber links [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63(7): 945-952.

[15] WLOSTOWSKI T, DANILUK G, LIPINSKI M M, et al. Trigger and RF distribution using White Rabbit [C]// International conference on accelerator and large experimental physics control systems (ICALEPCS2015), October 15-21, 2015, Melbourne, Australia. Geneva: Joint accelerator conferences website, 2015: 619-623.

[16] RONEN O, LIPINSKI M. Enhanced synchronization accuracy in IEEE1588 [C]// IEEE international symposium on precision clock synchronization for measurement control and communication (ISPCS2015), October 11-16, 2015, Beijing, China. Israel: Institute of electrical and electronics engineers, 2015: 76-81.

[17] COTA E G, LIPINSKI M, WLOSTOWSKI T, et al. White Rabbit specification: draft for comments[DB/OL]. (2010-09-08)[2020-01-01]. <http://www.ohwr.org/documents/21>.

[18] DANILUK G, WLOSTOWSKI T. White Rabbit: sub-nanosecond synchronization for embedded systems [C]// Proceedings of the 43rd annual precise time and time interval systems and applications meeting, November 14-17, 2011, Long Beach, California. Long Beach: Institute of navigation, 2011: 45-60.

[19] WLOSTOWSKI T. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network[D]. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2011.

[20] GRZEGORZ D. White rabbit calibration procedure [DB/OL]. (2015-11-09)[2020-01-01]. <https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Documents/White-Rabbit-calibration-procedure>.