

基于 ZYNQ 的 PTP 授时精度测量方法与实现*

宋 艳¹, 应斌杰¹, 杨成钢¹, 郝自飞¹, 毛立振²

(1. 国网浙江省电力有限公司 丽水供电公司, 浙江 丽水 316021; 2. 杭州量泓科技有限公司, 浙江 杭州 310019)

摘 要: 针对 PTP 授时精度测量存在的困难, 提出在 ZYNQ SOC 上用 μ COS 操作系统和 LWIP 协议栈, 来实现 PTP 授时精度测量。该方法通过接收卫星导航系统信号, 得到准确的系统时间和时钟源差, 利用硬件将系统时间同步至 ZYNQ 的纳秒计数器。利用 ZYNQ EMAC 接口获取 PTP 收发帧的观测时间, 并利用源差值实现对测量时间的补偿, 最终得到准确的时间戳, 进而实现对待测 PTP 主时钟授时精度测量。经实际测试, 利用该方法对 PTP 时钟进行测量, 能够获得优于 10 ns 的测量精度。

关键词: 精确时间协议; 授时; 卫星导航系统; 时间戳

中图分类号: TN927

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201167

中文引用格式: 宋艳, 应斌杰, 杨成钢, 等. 基于 ZYNQ 的 PTP 授时精度测量方法与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 115-118, 130.

英文引用格式: Song Yan, Ying Binjie, Yang Chenggang, et al. A method and implementation of PTP timing accuracy measurement based on ZYNQ[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 115-118, 130.

A method and implementation of PTP timing accuracy measurement based on ZYNQ

Song Yan¹, Ying Binjie¹, Yang Chenggang¹, Hao Zifei¹, Mao Lizhen²

(1. Lishui Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd, Lishui 316021, China;

2. Hangzhou Quantum Sensing Technology Co., Ltd., Hangzhou 310019, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of PTP timing accuracy measurement, this paper puts forward using μ COS operating system and LWIP protocol stack on ZYNQ SOC to realize PTP timing accuracy measurement. Accurate system time and clock source difference are obtained by receiving GNSS signals, and the system time is synchronized to the nanosecond counter of ZYNQ by hardware. The ZYNQ EMAC interface is used to acquire the observation time of PTP frames, and the source difference is used to compensate the measurement time. Finally, an accurate time stamps are obtained, which can be used to measure the timing accuracy of the PTP master clock. The test results show that using this method to measure PTP clock, the measurement accuracy is better than 10 ns.

Key words: PTP; timing; GNSS; time stamp

0 引言

精确时间协议(Precision Time Protocol, PTP)是一种高精度网络时间同步协议^[1-2], 具体内容 IEEE 1588 协议定义。IEEE1588 协议目前有 V1 和 V2 两个版本。其支持多种形式的传输, 比如 UDP/IPv4、UDP/IPv6 以及 IEEE 802.3 等。PTP 与网络授时协议(Network Timing Protocol, NTP)的主要区别是, PTP 是在物理层实现而 NTP 是在应用层实现。因此, PTP 比 NTP 具有更高的同步精度。PTP 可以达到亚微秒级授时精度, 在网络的节点(交换机)支持 PTP 协议的情况下, 能够实现纳秒量级的授时精度^[3-4]。

PTP 授时具有成本低、精度高、网络开销小等优点, 因此在通信、电力、轨道交通等领域得到了较为广泛的

应用^[5-8]。但也正因为其授时精度高, 使得对 PTP 授时设备授时精度的测量就显得更为困难。PTP 授时精度从理论上来说主要受两方面的影响, 一方面是打时间戳的位置, 另外是软件同步的算法。打时间戳目前可以在物理层、数据链路层和应用层上进行, 对应的授时精度会依次降低^[9-10]。目前主流的 PTP 授时设备均是基于 Linux 系统的, 而 Linux 系统为非实时操作系统, 中断响应时间在微秒级以上, 其无法获得精确的时间戳, 即便是使用了其他算法, 测量精度也在 100 μ s 以上^[11], 无法对 PTP 测量^[12-14]。相对 Linux 系统而言, μ COS 为实时操作系统, 能够获得更准确的时间, 可以用 μ COS 系统加 LWIP 协议栈来实现 PTP 精度测量。

1 PTP 授时基本原理

PTP 授时有一步和两步两种模式。不管是一步还是两步模式, 都包含三个关键的报文, 分别是同步报文

* 基金项目: 国网浙江省电力公司科学技术项目(52111LS1900BR)

Sync, 延迟请求报文 Delay_req 和延迟请求响应报文 Delay_resp。在两步模式下, 多一个跟随报文 Follow_up。图 1 给出了 PTP 授时的基本原理, 主时钟周期性地播发 Sync 报文。在一步模式下, Sync 报文中除包含一个预估的时间戳 t_p , 还包括一个校正时间 t_c , 则准确的时间戳 $t_1 = t_p - t_c$ 。从时钟接收到 Sync 帧, 即可获得时间戳 t_1 ; 在两步模式下, 当 Sync 报文通过网口发送时, 主时钟会通过位于底层的时标生成器获得 Sync 离开主时钟的精确时刻 t_1 , 而后发送跟随报文, 该跟随报文中包含了 t_1 。从时钟从跟随报文中获取时间戳 t_1 。两种模式对其他时间戳的获得方式是相同的。从时钟利用时标生成器可以精确测量 Sync 报文到达从时钟的时刻 t_2 , 并向主时钟发送延迟请求报文, 同时记录该报文离开从时钟的时刻 t_3 。主时钟收到延迟请求报文后, 记录其到达主时钟的时刻 t_4 , 并通过延迟请求响应报文反馈给从时钟。不管是主时钟还是从时钟, 获取的时刻都是在接近物理层打戳的。因此, 认为这种时刻是精确的。图 1 中的圆圈表示同步报文的时标生成处。

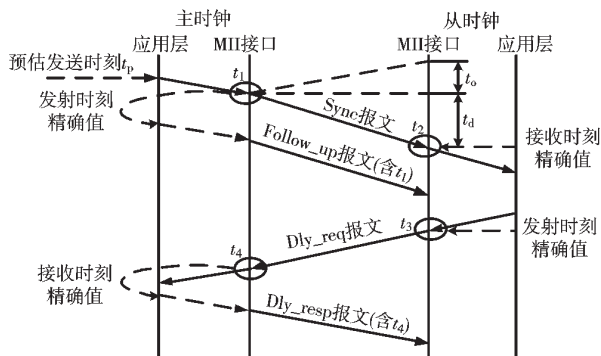


图 1 PTP 授时原理示意图

当报文交换完成时, 从节点处理所有四个时间戳, 用来计算从时钟相对于主时钟的偏移 t_o 和两节点间报文的传播时间 t_{d1} 和 t_{d2} 。

$$\begin{cases} t_{d1} = t_2 + t_o - t_1 \\ t_{d2} = t_4 - (t_3 + t_o) \end{cases} \quad (1)$$

假定链路时延是对称的, 即 $t_{d1} = t_{d2} = t_d$, 其中 t_d 为链路平均时延, 则有:

$$t_o = \frac{1}{2} (t_4 - t_3 - t_2 + t_1) \quad (2)$$

$$t_d = \frac{1}{2} (t_4 - t_3 + t_2 - t_1) \quad (3)$$

从时钟得到偏移 t_o 后, 将自己的本地时间减去 t_o , 就完成了与主时钟的同步。

2 PTP 授时精度测量方法

2.1 PTP 精度测量的基本方法

PTP 授时精度测量就是要测出主时钟相对于准确时间的偏差。文献[15]给出的方法是, 将 PTP 主时钟输出的 PPS 信号与绝对 UTC 的 PPS 信号进行比对, 进而得到主时钟授时精度。这种方法显然存在两个问题: 一是

绝对的 UTC 时间无法获得, 至少是极难获得; 二是 PTP 主时钟输出的 PPS 信号显然不能替代 PTP 协议提供的时间。

因此, 对测量设备而言, 首先必须要拥有具有足够准确的时间, 且根据测量需要, 该时间可以在 UTC 时、北京时、北斗时等时间系统之间选择。作为 PTP 测量设备, 其扮演了从设备的角色, 只不过其不向主时钟同步时间。测量过程中, 以测量设备时间为时间基准, 获得主设备与测量设备之间的偏差, 即为 PTP 授时设备的授时误差。若认为测量设备的时间是准确的, 则式(2)得到的时间偏差 t_o , 显然就是主时钟的授时精度。

由于 t_1 和 t_4 两个时间戳都来自于主时钟的报文, 测量的问题就转化为如何获得 t_2 和 t_3 两个时间戳。典型的方法是利用支持 IEEE1588 协议的以太网物理层收发器专用芯片, 比如 DP 83640 来获得时间戳。该芯片使用 25 MHz 的外部时钟, 在芯片内经频率综合后产生最高位 125 MHz 的 PTP 时钟。在使用 125 MHz 的 PTP 时钟时, 计数器的增量值为 8 ns, 也就是使用该芯片最高可以获得 8 ns 的分辨率。使用该芯片实现的最大特点是简单。但是也存在几个问题。一是测量的准确度与 PTP 时钟的准确度和稳定度密切相关, 而该时钟是由外部时钟经频率综合后产生的, 该时钟的漂移和抖动都是不可控的; 二是该芯片的时间戳需要通过 1PPS 信号进行同步。显然, 1PPS 的误差会传到给时间戳。在工程实践上, 也有人使用 FPGA 来对同步报文进行硬件标记, 这种做法需要额外的硬件逻辑设计, 增加了系统的硬件开销和开发难度[16]。

Xilinx 公司的 ZYNQ 系列 SOC 芯片的以太网驱动器提供了硬件 PTP 时间戳记录功能(ZYNQ 7010 不具备)。使用该芯片可以以更灵活更简单的形式, 实现 PTP 主时钟精度测量。ZYNQ 集成了 FPGA 和 ARM 处理器, 使用射频芯片和必要的外围芯片(DDR、Flash 等)加上 ZYNQ 就可以实现卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号的接收和解算, 从而获得参考时间, 而无需外部输入 1PPS 信号。只要相关算法设计得当, 在接收 GPS/BDS 信号时, 获得的时间与绝对 UTC 的偏差可以小于 10 ns。在很多情况下, 这个时间就可以作为测量 PTP 授时精度的时间基准了。

2.2 ZYNQ EMAC 时间戳获取

PTP 授时利用在物理层打时间戳实现时间传递。其时间戳包括 6 字节的秒计数和 4 字节的纳秒计数。其中秒计数的起点是 1970-1-1 00:00:00。ZYNQ 的纳秒计数满 1 s, 秒计数器进位, 纳秒计数器清零。为了方便起见, 下文中用纳秒计数器代替这两个计数器。纳秒计数器是在 PTP 时钟驱动下计数的, 比如, PTP 时钟是 125 MHz, 则一个时钟周期为 8 ns, 故增量计数器为 8 ns。若 PTP 时钟周期不是整数纳秒, 比如时钟为 120 MHz, 则时钟周期为 8.33 ns。由于增量计数器无法设置小数, 因此只能

采用折中的办法,将两个 8 ns 和一个 9 ns,也就是三个时钟周期平均为 8.33 ns。设置好增量计数器后,纳秒计数器就能与时钟周期对应起来了。

ZYNQ 接收到自主时钟的 Sync 数据包后,ZYNQ 在物理层打上时间戳,并产生接收中断,应用层任务可以读取该时间戳 T_2 。需要注意的是,考虑到响应和处理时间,无需对所有的 Sync 帧都响应。接收到 Sync 帧后,ZYNQ 向主时钟发送 Dly_req 请求帧,该帧离开 ZYNQ 网络控制时,ZYNQ 再次产生中断,并打上时间戳 T_3 。收发中断产生后,应用层软件可以从容读取这两个时间戳。

2.3 时间初始值同步

虽然 ZYNQ 可以记录并读取 T_2 和 T_3 两个值,但是需要注意的是,纳秒计数器反映的仅仅是时钟数与增量计数器的乘积。其含义是假定 PTP 系统时钟绝对准确的情况下,从初始值时刻至测量时刻为止流逝的时间。显然,要想使时间戳尽可能与真实时间一致,必须要解决两个问题,一是计数器初始值如何与真实时间保持同步,二是如何消除频差带来的影响。

由于 ZYNQ 的纳秒计数器没有提供硬件同步机制,只能通过寄存器写入的方式赋初值。一般情况下,在系统时间的整数秒将系统时间写入秒寄存器并将纳秒寄存器清零。如果写入过程中没有时延或者开销,显然很容易就能实现纳秒计数器与系统时间的同步。然而,向寄存器写入初值需要的时间波动高达微秒级,而且分布随机。因此,在整秒时刻向寄存器写初值,仅能实现纳秒寄存器的粗同步。如图 2 所示,假定在整数秒时刻写入,那么秒计数器写入的是当前秒的值,纳秒计数器写入值应该为 0。由于延时的存在,数值写入寄存器的真正时刻是 t_w ,而不是 0,显然纳秒计数器的值比真实时刻滞后了 t_w 。由于 t_w 在阴影区域内随机变化,因此无法通过提前补偿的方式消除写入时延带来的误差。 t_w 虽然无法通过提前补偿,但可以通过事后补偿的机制来处理。如图 2 所示,当 ZYNQ 完成向寄存器写入初值后,可以通过硬件方式立刻拍得写入完成后的时刻 t_r 。一般情况下,这个 t_r 与 t_w 之间只存在一个较为固定且很小的差值 Δt ,即 $t_w = t_r - \Delta t$ 。将 t_w 写入 ZYNQ 的补偿寄存器,使用这种方式补偿,就实现了纳秒计数器初值与系统时间的同步。

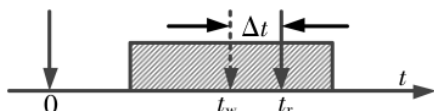


图 2 纳秒寄存器初始值同步示意图

2.4 频差补偿

虽然通过后补偿的方式能够解决初始值同步的问题,但是由于系统时钟的不准确性,随着时间的转移,误差会积累,这个误差会对测量结果带来很大影响。如图 3 所示,由于参考频率不准确,使得 PTP 纳秒计数器

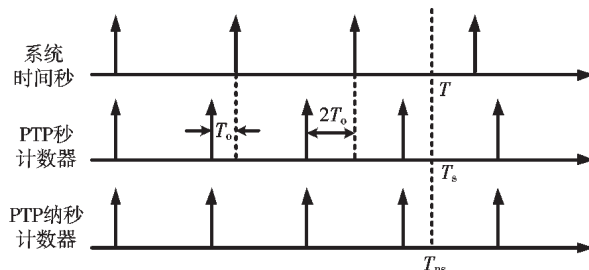


图 3 时钟源对测量结果的影响

和秒计数记录的时间都并非真正的时间。假如使用标称值为 10 MHz,准确度为 1×10^{-13} 的高档时钟源,则 1 s 由频率偏差引入的误差 T_0 可达 100 ns。因此,这个误差必须要进行消除才行。

通过接收卫星导航系统信号,可以测量出时钟源差 σ_s :

$$\sigma_s = \frac{f_m - f_0}{f_0} \quad (4)$$

其中 f_m 为测量到的频率, f_0 为标称频率。则真实的观测时刻 T 对应观测值分别为 T_s 和 T_{ns} ,考虑源差的影响后,其对应的真实值为:

$$T_{ps} = T_s / (1 + \sigma_s) \quad (5)$$

$$T_{pns} = T_{ns} / (1 + \sigma_s) \quad (6)$$

这样就得到了真实的时间。因此, T_2 和 T_3 对应的真实时刻 t_2 、 t_3 分别如式(7)、(8)所示。

$$t_2 = T_2 / (1 + \sigma_s) \quad (7)$$

$$t_3 = T_3 / (1 + \sigma_s) \quad (8)$$

t_1 、 t_4 来自 PTP 主时钟的数据包中获取。利用式(2)就可以测量出待测 PTP 主时钟的授时精度了。需要注意的是,由于频率源的不稳定性,每秒钟的偏差值 T_0 实际上是不一致的,在实际测试中,需要每秒都进行相应处理。

3 PTP 授时精度测量的实现

3.1 硬件架构

图 4 给出了利用 ZYNQ 进行 PTP 测量的硬件组成方案。由图可见,该测量方案的硬件组成非常简单。以 ZYNQ SoC 为核心,外围除了 Flash、DDR 等保证系统正常运行的硬件外,主要就是频率综合器和射频通道 ADC。除此之外,信号及信息的处理都在 ZYNQ 中以软件的形式

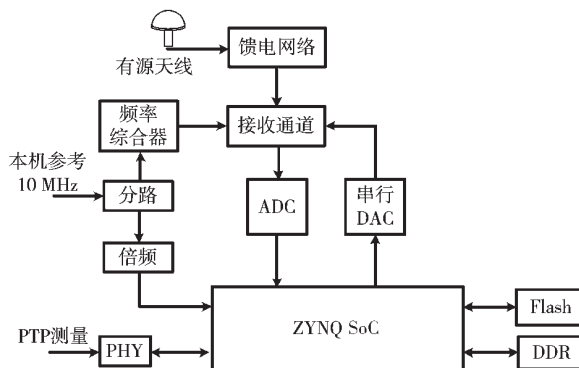


图 4 PTP 测量框图

式完成。

3.2 软件流程

PTP 测量的软件流程如图 5 所示。由图可见,首先需要完成导航信号的捕获、跟踪、解算,这一个过程实质上就是传统的导航接收机信号处理及解算过程。与之不同的是,当解算完成,得出本地位置后,要进一步进行钟差和频差的计算,为准确的源差测量提供保证。当获得了准确的系统时间和频差后,就能以此进行 PTP 授时精度测量了。测量的基本流程如图 6 所示(以两步模式为例)。



图 5 软件处理基本流程

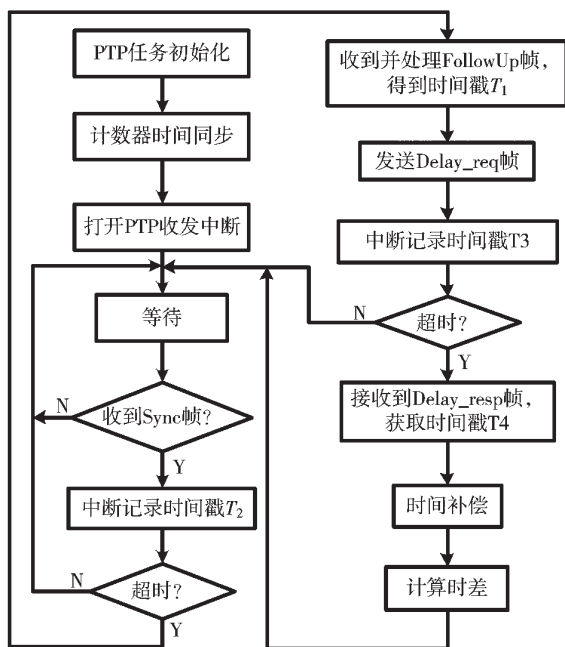


图 6 PTP 精度测量流程图

3.3 实测结果

利用本方案实现的 PTP 精度测量设备,对西安同步 SYN2407 主时钟授时精度进行了超过 30 min 的测量,测

量数据如图 7 所示。测试结果表明,即使不考虑 PTP 主时钟精度对测量结果的影响,该方案也能获得优于 10 ns 的测量精度(图 7 中的标准差即为测量精度)。经第三方权威机构检测,本方案对 PTP 授时设备的测量精度可达 10 ns 以下(1σ)。

4 结论

随着信息设备对时间精度需求越来越高,可以预见 PTP 网络授时将会应用到更多场合,对 PTP 授时设备的授时精度也将提出更高的要求。一文中提出的方法能够以一种比较简单的方案实现 PTP 授时精度测量,能够满足对高精度 PTP 主时钟授时精度测量的需求。

参考文献

- [1] 张贺,张林,郑滢雷,等.1588v2 中的 PTP 报文格式及应用[J].邮电设计技术,2011(8):29-33.
- [2] 张彪,杨柳涛.IEEE1588 PTP 技术分析及其实现研究[J].上海船舶运输科学研究所学报,2013(3):46-51.
- [3] 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(3):35-40.
- [4] 马昭,葛文双,胡爱兰,等.基于 PTP 授时的高可靠时间统一系统的应用研究[J].电子技术应用,2019(5):38-42.
- [5] 王洋.电信网中基于 IEEE 1588 标准的时钟同步研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [6] 陆明泉,张娜,刘静.基于 PTP 的变电站频率与时间同步方案研究[J].电力信息与通信技术,2013(12):34-37.
- [7] 连伟华,张国翊,朱海龙,等.电力变电站的时间质量检测[J].通讯世界,2018(3):162-163.
- [8] 朱炎平,陆俊,徐志强,等.智能变电站 IEEE 1588 同步时延优化方法[J].电力系统自动化,2018,42(12):148-153.
- [9] 欧阳家淦,岑宗浩,周健.PTP 时钟同步协议分析及应用探讨[J].华东电力,2008(8):62-65.
- [10] 崔全胜,魏勇,何永吉,等.PTP1588 协议的分析[J].电力系统保护与控制,2011(10):148-154.
- [11] 陈良华,黄源.PTP 协议时间同步精度测试[J].仪器仪表用户,2008(2):73-74.
- [12] 朱望纯,钟震林,覃斌毅.嵌入式 Linux 设备的高精度 IEEE 1588 时钟同步实现[J].计算机测量与控制,2014

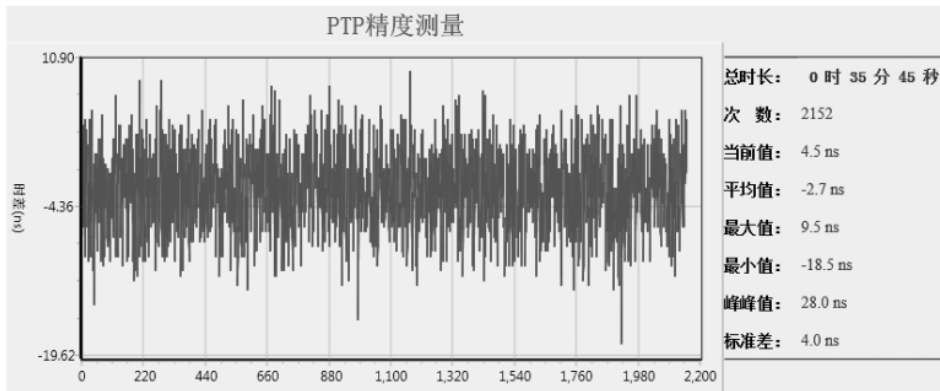


图 7 PTP 精度测量实测数据

(下转第 130 页)

- ence on Digital System Design: Architectures, Methods and Tools. IEEE, 2009: 441-448.
- [3] 张颖. 卫星数传 VCM/ACM 链路的关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
- [4] 夏宇闻. VerilogHDL 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [5] MUELLER K H, MULLER M. Timing recovery in digital synchronous data receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(5): 516-531.
- [6] Gardner F M. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986.
- [7] BARLETTA L, MAGARINI M, SCARDONI F, et al. Impact of loop delay on the performance of Gardner timing recovery[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(18): 1797-1800.
- [8] Huang Zhen, Yang Pan, Zhang Wei. Improved gardner suppression timing jitter synchronization algorithm[J]. Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2020, 8(1): 21-26.
- [9] 韩孟来, 倪永婧. 一种 16 倍采样的 Gardner 定时同步方法[J]. 电讯技术, 2019, 59(2): 223-228.
- [10] 杜勇. 数字通信同步技术的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [11] 吴大维. 一种 QPSK 解调器(松尾环)的研制[J]. 电讯技术, 1990(4): 22-26.
- [12] SANGRIOTIS M, XEZONAKIS I. Digital costas loop-like PLL for the carrier recovery of a QPSK signal[J]. Electronics Letters, 1993, 29(10): 897-899.
- [13] LINN Y. Robust M-PSK phase detectors for carrier synchronization PLLs in coherent receivers: theory and simulations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(6): 1794-1805.
- [14] 何宗苗, 姚远程, 秦明伟. 基于 System Generator 的盲均衡器设计与实现[J]. 电子技术应用, 2014(7): 33-36.
- [15] 刘俊杰. 全数字锁相环电路的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [16] 杜瑜. 三阶数字锁相环环路参数的设计方法[J]. 电讯技术, 2007(5): 156-158.

(收稿日期: 2020-12-21)

作者简介:

罗强(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 高速数传技术。



扫码下载电子文档

(上接第 118 页)

- (5): 1619-1622.
- [13] 赵洪锬. 基于嵌入式 Linux 的 IEEE1588 协议的分析与实现[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [14] 王晋祺, 陈鸿. 基于 ARM 的 IEEE1588 精密时钟同步协议实现[J]. 电子器件, 2019(6): 1527-1531.
- [15] 陈炯聪. IEEE 1588 同步技术在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [16] 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(3): 30-33.

(收稿日期: 2020-12-02)

作者简介:

宋艳(1975-), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 信息、通信技术及调度自动化技术。

应斌杰(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 通信工程。

毛立振(1993-), 通信作者, 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 电力系统及自动化, E-mail: 137356994@qq.com。



扫码下载电子文档

(上接第 125 页)

- [15] BOIYO D K, CHABATA T V, KIPNOO E K R, et al. Reconfigurable high-speed optical fiber networks: optical wavelength conversion and switching using VCSELs to eliminate channel collisions[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 33: 30-35.

(收稿日期: 2020-12-17)

作者简介:

朱敏(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电子系统自动化测试。

吴楠(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: FPGA 应用及数字图像处理。

杨春玲(1965-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 电子系统设计, E-mail: yangcl1@hit.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所