

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-02-0085-09

皮秒级 16 通道精密事件计时器研制

陈法喜^{1,2,3}, 孔维成^{1,2,4}, 赵侃^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 张首刚^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;
3. 西安电子科技大学, 西安 710071;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 精密时间测量是高精度守时、授时、用时的基础, 目前精密时间测量的设备主要依赖进口, 尤其是皮秒级精密多通道的事件计时器。笔者研制的皮秒级 16 通道精密事件计时器, 每个通道触发信号采用独立时间戳技术, 通道间不存在测量死区, 且不受指定的开门、关门信号或者参考通道的影响, 可以灵活测量统计各个通道间触发信号的时间间隔, 或者单个通道多个触发信号的时间间隔, 拓宽了应用范围。皮秒级 16 通道精密事件计时器采用高速时间-数字转换的方式, 并引入自动校准的方法来保证测量的准确度和稳定度, 使测量分辨率优于 5 ps, 测量稳定度优于 $0.6 \text{ ps}@1\ 000 \text{ s}$, $0.2 \text{ ps}@10\ 000 \text{ s}$ 。

关键词: 事件计时器; 皮秒级; 16 通道; 时间戳

Development of picosecond 16 channels precise event timer

CHEN Fa-xi^{1,2,3}, KONG Wei-cheng^{1,2,4}, ZHAO Kan^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. School of Microelectronics, XiDian University, Xi'an 710071, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Precision time measurement is the basis for high-precision punctuality, time service and time usage. At present, the acquiring of the equipment for precision time measurement mainly relies on importation, especially the picosecond-level precision multi-channel event timers. The picosecond 16-channel precision event timer described in this article employs a technique of using independent time stamping on the trigger signals for each single channel. There is no measurement dead zone between the channels, and it is not affected by the designated switching-on/switching-off signals or the reference channels. Therefore, with great flexibility, the picosecond 16-channel precision event timer can measure and count the time interval of trigger signals between channels, and that between the multiple trigger signals of a single channel, which broadens the possibility of its application. The picosecond 16-channel precision event timer utilizes a high-speed time-to-digital conversion method and introduces an automatic calibration method to ensure the accuracy and stability of the measurement,

收稿日期: 2019-11-29; 接受日期: 2020-01-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)资助项目(XDB21030200)

作者简介: 陈法喜, 男, 副研究员, 主要从事精密时间测量与时间同步研究。

making the measurement resolution better than 5 ps and the measurement stability better than 0.6 ps @ 1 000 s and 0.2 ps @ 10 000 s.

Key words: event timer; picosecond level; 16-channel; time stamp

0 引言

随着信息化、数字化时代的到来,高精度时间频率已经成为一个国家科技、经济、军事和社会生活中至关重要的参量,其中精密时间测量是进行高精度守时、授时、用时的重要基础。在前沿科学实验、工程应用以及社会生活等领域中精密时间测量有着广泛应用并发挥着不可或缺的作用^[1-2]。

时间频率的测量精度是目前所有物理量及物理常数中最高的,在冷原子碰撞的实验研究、Stark 效应实验研究、相对论验证、引力红移测量、引力波探测等一些前沿科学实验中,其测量精度都直接取决于对时间频率测量的最高精度;在雷达测距、频率测量^[3-4]、激光遥感技术^[5]、光纤时间传递^[6]等实际工程应用中,时间频率的精密测量也起着至关重要的作用,如在应用了激光测距系统的各大工程中,时间的测量精度是影响系统最终测定距离精度的主要因素^[7-9];在社会生活中,卫星导航系统是基于测量时间差的测距定位系统,时间频率信号的测量是卫星导航系统最重要的技术基础之一,用户的位置和速度信息是通过测量时间获得,可见,现代科学技术的发展越来越依赖于精密时间测量精度的进一步提升。

事件计时技术就是一种重要的精密时间测量技术,它是将前后相邻两个输入信号视为两个相互独立的事件,通过测量各个事件与某一确知时刻点的时间间隔,得到事件发生的具体时刻^[10]。高精度事件计时器在日常生活、工业生产、前沿科学实验以及航空航天等国防建设中不仅有着广泛的应用,在多种应用环境下,对事件计时器均提出了多通道、无死区、高分辨率等要求。中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室内有 24 台优质铯原子钟和 8 台氢钟,需要对多个时间频率源进行优于 100 fs 的高精度比对。在卫星激光测距、空间碎片探测等应用中,对事件计时器不仅提出了皮秒量级的高精度测量需求,还对多通道与无死区测量提出了较高要求^[11-12]。

目前,研究设计事件计时器较为突出且有相应产品的国家主要有拉脱维亚、法国、美国等。其中应用较广泛的事件计时器是由拉脱维亚研发的 A033-ET,其单次测量分辨率优于 5 ps,仅支持两路信号同时测量,且存在死区时间为 50 ns^[10,13-14];相较于 A033-ET 型事件计时器,由 Guidetech 公司生产的 GT668 系列的产品时间测量分辨率可达到 0.9 ps^[15],无通道间的测量死区,但价格高昂;我国对于事件计时器的研究起步较晚,国家授时中心、上海天文台、云南天文台等研究机构致力于事件计时器的自主研发,测量分辨率约 50 ps^[10,16-17],目前国产皮秒级商用多通道时间间隔测量仪(MTIM)的测量分辨率可优于 10 ps^[18],因此我国事件计时器的整体技术水平与国外产品还存在一定差距。

国内的事件计时器设备精度不够高,难以投入对时间测量精度要求较高的项目使用,因此在要求高精度时间测量的工程应用项目中,目前我国大多数精密时间测量的设备还是依赖进口,尤其是皮秒级精密事件计时器。然而,进口设备不但价格昂贵,且技术受制于国外,如美国 SR620、HP5370B、拉脱维亚 A033-ET^[16]及 Guidetech GT668 系列产品均仅有两个测量通道,且价格昂贵,难以很好地满足工程应用及科学研究中多个事件之间时间间隔同时测量的实际需求,亟待研制一台具有自主知识产权的皮秒级多通道精度事件计时器。因此皮秒级 16 通道精度事件计时器的成功研制,满足了皮秒级的高精度需求、实现了 16 通道无死区测量、保证了实际工程项目应用。

1 计时器架构设计

皮秒级 16 通道精密事件计时器的系统架构框图如图 1 所示,主要包含 PLL (phase locked loop) 锁

相环模块、16 个独立工作的事件计时模块、主控单元、通信接口、LCD（液晶显示器）与校准模块。

本文所述事件计时器由外部时钟为 16 个事件计时模块统一提供 1 PPS 计时开门信号，由外部频率源提供 5 MHz/10 MHz 频率信号，经由 PLL 实现 5 MHz/10 MHz 频标自适应功能，输出稳定的 100 MHz 频率信号，为 16 个事件计时模块提供相同频率的系统时钟信号。

事件计时器设计有 16 个事件输入通道分别对应于内部 16 个独立的事件计时模块，每个事件计时模块以打时间戳的方式对各通道输入的事件进行计时，若 16 个事件计时模块均设为工作状态，即可得到 16 个事件计时值，并通过主控单元控制自动校准模块对每次的测量值进行校准。

用户可以通过通信接口向主控单元发出相关指令，来指定参考通道。例如用户指定通道 2 为参考通道，要求输出其他各通道事件与通道 2 事件之间的时间间隔，主控单元通过通信接口接收用户指令，并根据用户指令通过内嵌高速率数据处理单元处理各计时模块的直接测量数据（ T_1, T_2, \dots, T_{16} ），将用户要求输出的其他各通道事件与通道 2 事件之间的时间间隔通过 LCD 实时显示。

此种设计方式保证了各通道事件计时的独立性；16 通道的设计大大增强了事件计时的并行度；通信接口的设计实现了人机交互，用户可以灵活指定输入通道、参考通道及输出数据类型（直接测量的事件计时值或相对事件间隔），简化了测量操作。

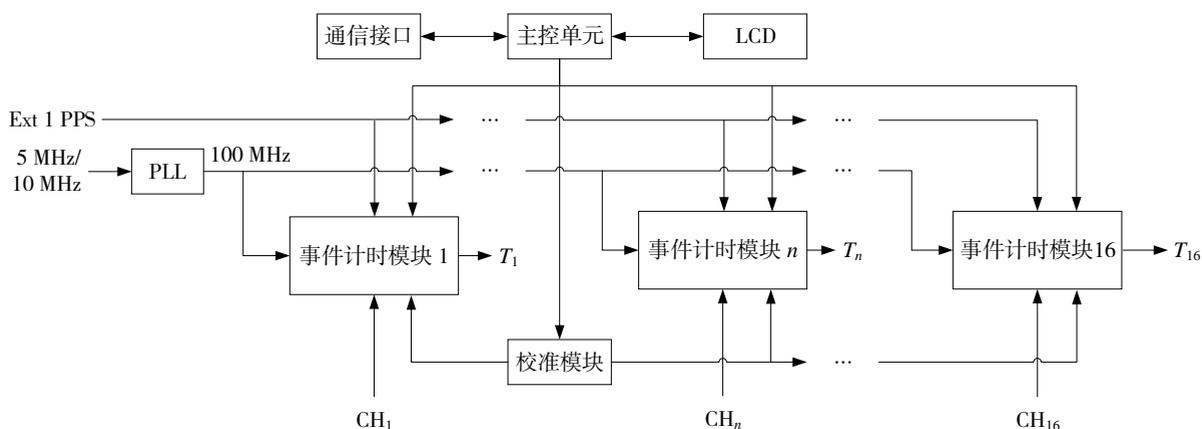


图 1 皮秒级 16 通道精密事件计时器系统架构框图

各独立事件计时模块内部组成图如图 2 所示，每个事件计时模块 x 均设计有独立的 $FPGA_x$ 计时器与时间数字转换模块及 MCU_x （微控制单元 microcontroller unit）。

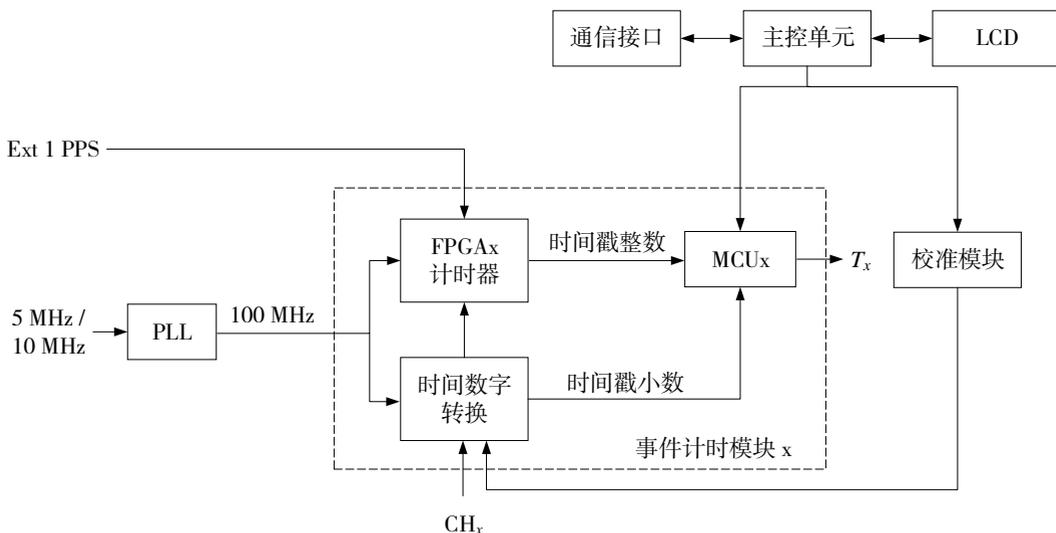


图 2 事件计时模块内部组成图

外部时钟提供的 1 PPS 信号作用在每个事件计时模块内部的 FPGA_x 计时器上,保证了各个事件计时模块之间的时间同步。外部频率源提供的 5 MHz/10 MHz 经 PLL 锁相环自适应调整输出 100 MHz 频率信号为 FPGA_x 计时器与时间数字转换模块提供稳定的系统时钟,系统时钟周期记为 T_0 。事件计时模块通过打时间戳的方式分别测量了该事件计时值整数部分与该事件计时值小数部分,其中, FPGA_x 计时器记录时间戳整数部分,时间数字转换模块记录时间戳小数部分,由 MCU_x 单元将时间戳整数部分与时间戳小数部分进行整合运算,即得到各个通道所输入事件的对应计时值 T_x 。

在每次测量结束的时候,自动校准模块内部产生 T_0 与 $2T_0$ 的两种脉宽信号来对测量时间数字转换模块进行校准,保证了测量的准确性。设备 16 通道间的系统误差,通过输入外部的被测信号进行校准,从而减少了 16 通道间的系统误差。

2 计时器精密测量原理

时间数字转换原理图如图 3 所示,通过将被测事件对应的触发信号转化为线性的斜坡信号,再采用高速 ADC (数字模拟) 转换器进行采集,其中 ADC 转换器的采样时钟是由系统时钟提供的,而校准数据模块可由 ADC 转换器的采样值计算出触发事件与系统时钟的相位差 ΔT 即为时间戳小数部分;其次触发事件与系统时钟的整周期时间差由 FPGA 计时器记录,计时值记为 N ,即可得到时间戳的整数部分 NT_0 ;最后将得到的时间戳整数部分与时间戳小数部分送入 MCU 单元进行整合运算,得到被测事件的对应计时值 $T = NT_0 + \Delta T$ 。

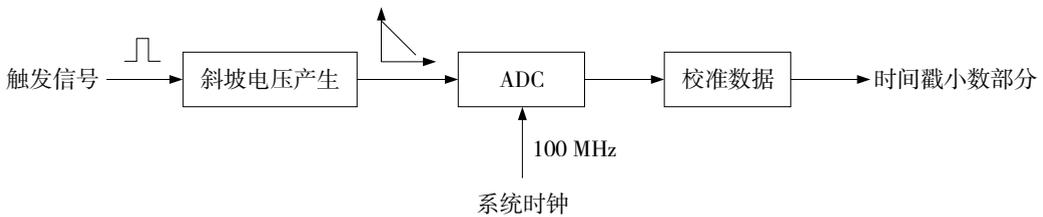


图 3 时间数字转换原理图

以通道 1 为例进行说明, CH_1 的被测事件信号输入,触发线性斜坡电压产生电路 1 工作,产生斜坡电压信号。由系统时钟提供高速 ADC₁ 所需 100 MHz 采样时钟,使 ADC₁ 记录下线性斜坡电压转换的数据 AD_1 ,并由 FPGA₁ 计时器记录了当时的系统计时单元的计时值 N_1 ,再由校准数据模块根据 AD_1 的值计算出触发事件与系统时钟的相位差 ΔT_1 ,最后由 MCU 单元进行整合运算,计算出该事件的计时值 $T_1 = N_1T_0 + \Delta T_1$,时序图如图 4 所示。

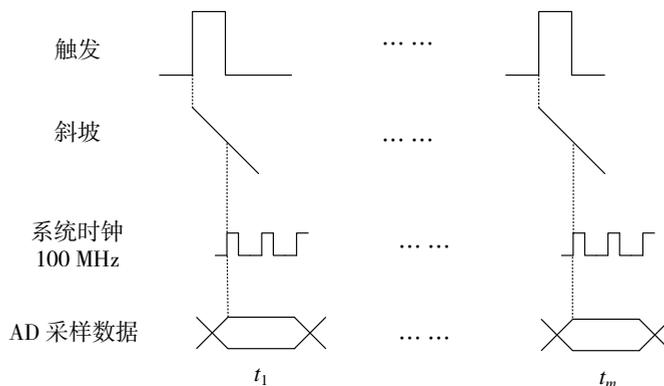


图 4 时间数字转换时序图

同理,通道 x 的事件计时值 $T_x = N_xT_0 + \Delta T_x$,其中 N_xT_0 为计时值的时间戳整数部分, ΔT_x 为计时值的时间戳小数部分。

3 计时器实现

根据上述原理设计研制的事件计时器整机实物图如图 5 所示。左侧为 16 个通道的指示灯，右侧为 LCD 触摸显示屏，用户可通过在 LCD 上进行功能设定实现与主控单元的通信，从而灵活指定输入通道、参考通道及输出数据类型（直接测量的事件计时值或相对事件间隔），并在 LCD 上实时显示系统根据用户需求所处理的结果。如指定通道 2 为参考通道，各通道的对应窗口显示的结果即为与通道 2 所输入事件的测量差值。图 6 为设备内部硬件实现图，每个通道对应有一块独立的计时处理单元，统一由外部时钟为 16 个通道提供 1 PPS 计时开门信号，由外部频率源提供 5 MHz/10 MHz 频率信号，因此各个通道采集到的事件计时值是相互独立的，从而很大程度降低了通道间的干扰。



图 5 整机实物图

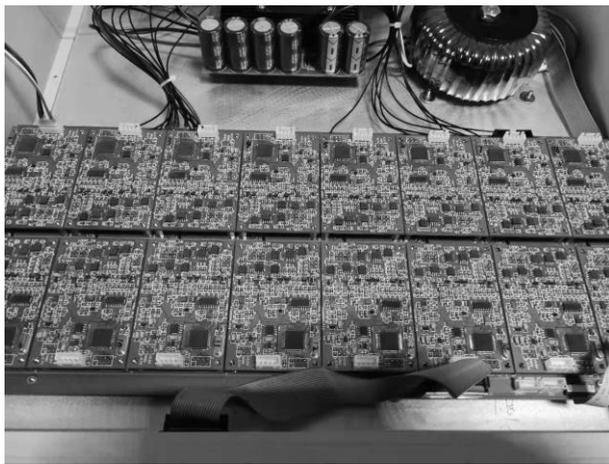


图 6 设备内部硬件实现图

笔者研制的事件计时器指标较高，如果外部输入的 10 MHz 参考频率信号太差，将难以保证锁定后的 100 MHz 时钟信号的稳定性和准确度，从而会影响事件计时器的测量稳定性和准确度，所以采用了较为稳定的铷原子钟作为频率基准提供事件计时器外部输入的 10 MHz 参考频率信号，内部采用了 100 MHz 的 SC 切恒温晶振作为时钟基准，并将 100 MHz 恒温晶振锁定在外部输入的 10 MHz 参考频率信号上以保证测量稳定性和准确度。

由于事件计时器内部采用 100 MHz 的系统时钟信号，时间戳整数部分可以达到约为 10 ns 的测量精度，更高精度的测量依赖由时间数字转换模块计算出的时间戳小数部分，即触发事件与系统时钟的相位差 ΔT 的精度决定，理论上相位差可以达到非常高的精度但实际测量精度限于硬件电路的噪声。触发事件与系统时钟的相位差数据 AD_x 是由校准数据模块根据 AD_x 的值计算而来，本文采用了 16 位的高速 ADC 转换器来记录线性斜坡电压转换的数据 AD_x ，且 ADC 转换器的采样时钟为 100 MHz 的系统时钟，故理论测量分辨率约为 15 fs。设备实现过程中，由于电路噪声以及技术和成本的限制，高精度测量的实现工作还有很大的提升空间，可通过硬件配合调试工作进一步提升测量精度。

4 测试及数据分析

为了便于分析事件计时器各个通道固有的偏差，首先给脉冲分配器输入一个 1 PPS 信号，然后将脉冲分配器 16 个通道的输出接口与确定的一根同轴线配对连接，这个连接关系在实验期间保持不变，再将脉冲分配器除通道 2 信号以外的其他通道信号通过各自配对的同轴线轮流接入到事件计时器的通道 1，多次测量脉冲分配器的每个通道信号，计算平均值并记录，这里设置测量次数为 100 次，所记录下脉冲分配器 15 个通道信号的数据，即为脉冲分配器信号偏差数据，如表 1 所示。

按照如图 7 所示的测试框图，时间频率源输出 10 MHz 频率信号为事件计时器提供稳定的系统时钟，1 PPS 信号由脉冲分配放大器为 16 个通道提供事件脉冲，通过事件计时器进行事件计时，并将计时结果存储于 PC 端。脉冲分配放大器与事件计时器连接的 16 根电缆线为基本等长同轴线，他们之间的传输时延差异小于 100 ps。由于后续实验前将进行固定偏差的标定，后续实验中只需要每根同轴线与脉冲分配器确定的一个输出通道连接使用，故而这 100 ps 左右的偏差不影响实验的结果。

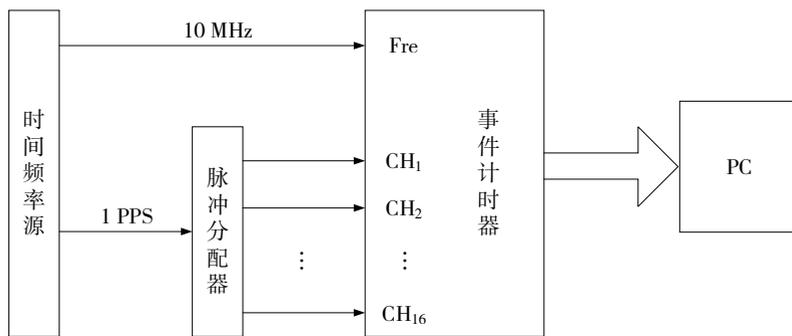


图 7 测试框图

将脉冲分配器的 16 个通道输出信号通过其固定配对的同轴线依次与事件计时器的 16 个输入通道相连，并在液晶界面上指定通道 2 为参考通道。事件计时值的直接测量数据图如图 8 所示。各个通道所输入事件的测量值有所不同，16 通道的测量时间偏差均在 ± 250 ps 范围内。事件计时器各个通道测量偏差数据如表 1 所示。可见，由事件计时器引入的附加偏差已优于 10 ps，所以此处事件计时器通道间测量值偏差主要来源于脉冲分配器 16 个输出通道及其在实验中固定配对的同轴线间存在的传输时延差异。

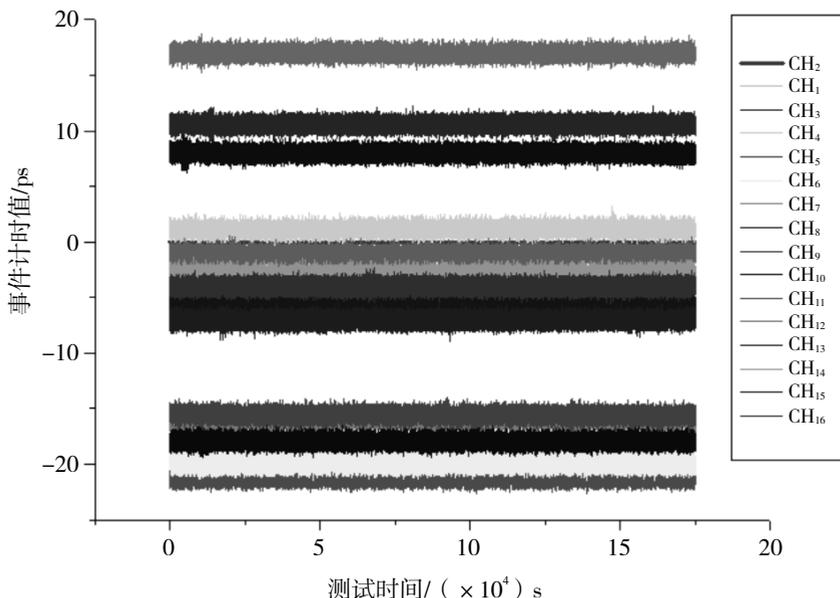


图 8 测量数据图

表 1 事件计时器各个通道测量偏差 单位: ps

通道号	脉冲分配器信号偏差	事件计时器测量值	测量偏差
CH ₁	156	163	7
CH ₃	-45	-55	-10
CH ₄	20	12	-8
CH ₅	-203	-212	-9
CH ₆	-202	-200	2
CH ₇	-167	-160	7
CH ₈	-172	-179	-7
CH ₉	96	105	9
CH ₁₀	-79	-70	9
CH ₁₁	-5	-11	-6
CH ₁₂	178	170	-8
CH ₁₃	85	80	-5
CH ₁₄	-36	-29	7
CH ₁₅	-49	-40	9
CH ₁₆	-165	-155	10

我们采用标准差来描述测量分辨率,表 2 即为各非参考通道的标准差数据,通过 180 ks 的连续测量,经数据分析可以得到每个通道的标准差均优于 5 ps 的结果,即本文所述皮秒级 16 通道精密事件计时器的测量分辨率优于 5 ps。

表 2 事件计时器各通道标准差数据 单位: ps

通道号	标准差	通道号	标准差
CH ₁	3.97	CH ₁₀	3.57
CH ₃	3.60	CH ₁₁	3.55
CH ₄	3.57	CH ₁₂	3.57
CH ₅	3.56	CH ₁₃	3.58
CH ₆	3.57	CH ₁₄	3.55
CH ₇	3.60	CH ₁₅	3.53
CH ₈	3.58	CH ₁₆	3.57
CH ₉	3.58		

测量数据的时间偏差 (TDEV) 表征了测量设备的测量稳定度,图 9 为 TDEV 稳定度数据分析图,部分具体数值在表 3 中列出。由表 3 可知,每个通道测量数据的 TDEV 稳定度均优于 0.6 ps@1 000 s, 0.2 ps@10 000 s, 具有较好的长期测量稳定度,即本文所述皮秒级 16 通道精密事件计时器的系统误差长期漂移值较小。

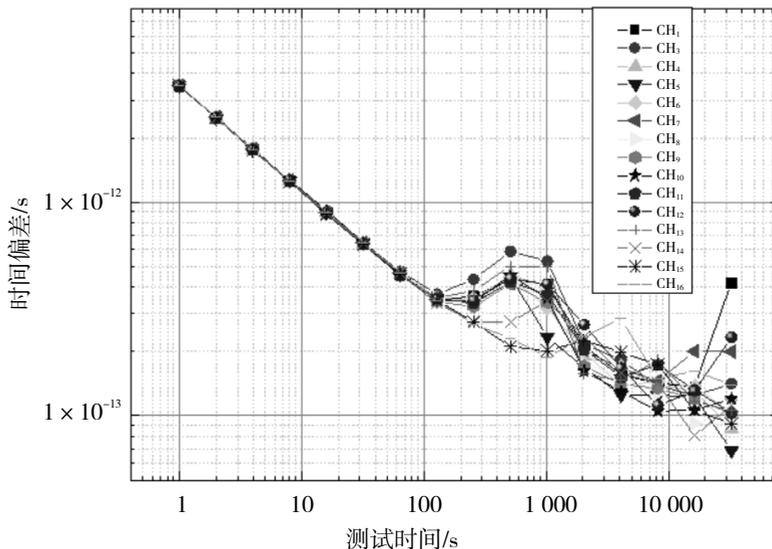


图9 TDEV 稳定度数据分析图

表3 事件计时器各通道部分 TDEV 数据

单位: ps

通道号	TDEV@1 000 s	TDEV@10 000 s	通道号	TDEV@1 000 s	TDEV@10 000 s
CH ₁	0.415 82	0.148 68	CH ₁₀	0.366 31	0.101 38
CH ₃	0.541 99	0.132 17	CH ₁₁	0.376 50	0.170 63
CH ₄	0.406 47	0.141 68	CH ₁₂	0.419 27	0.115 25
CH ₅	0.244 67	0.127 00	CH ₁₃	0.502 08	0.168 41
CH ₆	0.328 45	0.150 69	CH ₁₄	0.342 20	0.126 29
CH ₇	0.413 79	0.151 64	CH ₁₅	0.201 34	0.143 23
CH ₈	0.415 00	0.113 59	CH ₁₆	0.188 73	0.141 60
CH ₉	0.348 76	0.135 01			

5 工程应用价值

笔者所研制皮秒级 16 通道精密事件计时器的重要性能之一为: 可指定参考通道。

目前国内外的多通道事件计时器, 均已设置默认参考通道, 不能任意指定参考通道, 而本文所述皮秒级 16 通道精密事件计时器, 各个通道采集到的事件计时值是独立的, 且不受指定的开门关门信号或者参考通道的影响, 可以灵活测量统计各个通道间的触发信号的时间间隔, 或者单个通道的多个触发信号的时间间隔, 拓宽了应用范围。主控单元可以对各个通道采集到的事件计时值按照实际需求进行预处理, 减轻了对外数据传输的压力, 并提高了后续运算的效率, 满足实际应用场景的需求。如 CH₁ 所输入事件 1 的到达时间为 T_1 , CH₂ 所输入事件 2 的到达时间为 T_2 , 那么事件 1 与事件 2 的时延值为 $T_{\Delta} = T_2 - T_1$ 。具体需求可通过通信接口对主控发送相应命令, 主控将根据实际需求进行相应数据处理并将结果显示于 LCD, 便于实时监测。

笔者所研制皮秒级 16 通道精密事件计时器的重要性能之二为: 实现通道间无死区测量。

目前大多数皮秒级精密事件计时器均存在纳秒及以上量级的通道间测量死区, 而实现无死区测量的产品非常昂贵, 本文所述皮秒级 16 通道精密事件计时器, 16 个通道均有各自的计时值以及小数部分测量单元, 采用给每个通道的各个触发信号进行打时间戳的方式, 避免了如两个 1 PPS 信号时间间隔接近 0 或者 1 s 时出现 2 s 才触发一次丢失触发信号的现象, 消除了各个通道间的测量死区。16 个通道共用系

统时钟计时单元,即计时值整数部分,保证了系统时钟的一致性和计时起始时刻的一致性,从而很大程度上消除了各个通道间的系统误差。

通过将被测事件转化为线性的斜坡信号,由于触发事件信号产生的斜坡电压信号维持时间 T_s 大于系统时钟周期 T_0 ,所以系统时钟对该斜坡电压信号的AD采样值至少有一次落在线性区,再用测量设备内部系统时钟对斜坡电压信号进行高速AD转换,从而得到被测信号准确的到达时间,提高了事件计时的分辨率,同时保证了计时的速率。而计算触发信号的计时值也是依据对线性区的AD采样得到的,这提高了事件计时测量的线性度,并从原理上避免了被测信号与测量设备内部系统时钟竞争冒险引起的亚稳态问题,提高了测量的可靠性。

另外,笔者设计了开机自动校准功能,并使外部时钟重新统一提供1PPS事件计时开门信号从而保证了测量的准确性及16通道的测量一致性,降低了系统误差。本文还设计了内外频标自动切换的功能且可以实现自适应5MHz/10MHz频标,使设备更加智能化。

6 结语

笔者研制的皮秒级16通道精密事件计时器,采用给每个通道的各个触发信号进行打时间戳的方式,实现了通道间的无死区测量,并可以灵活测量统计各个通道间或者本通道内的触发信号的时间间隔;采用高速时间-数字转换的方式,并引入自动校准的方法来提高测量的线性度和准确度;并解决了通道间的干扰问题,使16个通道同时工作时,各个通道的测量分辨率都优于5ps。研制出的皮秒级16通道精密事件计时器工程化程度较高,可以直接应用于多个原子钟或者多个时间信号的高精度比对等实际应用中。

参考文献:

- [1] 班超. FPGA高精度时间测量[D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- [2] 张廷华,樊桂花,孙华燕,等. 基于FPGA的高精度时间间隔测量方法研究与实现[J]. 光学技术,2006,32(S1):452-454.
- [3] 李炎,赵伟,黄巧巧,等. 多通道高精度动态频率测量系统的研究与实现[J]. 电子测量技术,2012,35(12):75-80.
- [4] 陈丽锋,孟瑞,冯希. 频率测量研究综述[J]. 电力电子,2011,31(2):50-54.
- [5] 黄武煌,王厚军,叶芄. 一种高速全波形采集与高精度定位技术研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):73-79.
- [6] 赵侃,梁双有,陈法喜,等. 精密时间间隔计数器的研制[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学),2011,41(5):602-606.
- [7] 宋建辉,袁峰,丁振良. 脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量[J]. 光学精密工程,2009,17(5):1046-1050.
- [8] 冯志辉,刘恩海,岳永坚. 基于FPGA延迟线插入法的半导体激光测距[J]. 光电工程,2010,37(4):53-59.
- [9] 袁春,王飞,陈娟. 基于FPGA的精密时间测量系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(12):76-79.
- [10] 饶子兵. 高精度事件计时器研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [11] 秦思,吴志波,张海峰,等. 高精度事件计时器及其在卫星激光测距应用[J]. 激光与红外,2019,49(4):419-423.
- [12] 刘琼瑶. 多通道时间间隔计数器的设计和实现[D]. 西安:中国科学院大学(国家授时中心),2019.
- [13] ARTYUKH Y, BESPAL'KO V, BOOLE E, et al. Event timer A033-ET: current state and typical performance characteristics[R]. 17th International Workshop on Laser Ranging, Bad Kotzting: [s.n.], 2011: 107-110.
- [14] MEIERINŇŠ A. Event Timer A033-ET Manual[EB/OL]. (2015-01-28)[2019-07-11]. <http://www.dl.acm.org/institution/60071046.html>.
- [15] 皮晓宇,鞠青华,汤儒峰,等. Guidetech GT668SLR-1事件计时器在卫星激光测距中的应用研究[J]. 天文研究与技术,2017,14(4):429-435.
- [16] 李雅琳. 高精度事件计时器软件设计[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [17] 侯志军,马红皎,王康,等. 基于TDC-GPX2的精密时间间隔测量仪设计[J]. 时间频率学报,2017,40(4):213-220.
- [18] 潘峰,张军,霍海强,等. 国产皮秒级多通道时间间隔测量仪在工程中的应用[J]. 时间频率学报,2019,42(4):301-309.