

引用格式：刘科伟, 荆文芳. 多通道高精度时间间隔计数器的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2023, 46(1): 8-20.

多通道高精度时间间隔计数器的设计与实现

刘科伟^{1,2}, 荆文芳^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为满足时频领域的高精度时间比对的需求, 本文采用 MCU (micro controller unit) 和 TDC (time-to-digital conversion) 芯片相结合的方式实现了对四通道并行输入信号的高精度时间间隔测量。详细论述了时间间隔测量的原理、系统实现方法 (硬件组成和软件设计)、误差处理和系统性能评价指标, 并搭建测试平台对设备性能进行测试。测试结果表明: 本系统可以实现四通道时间间隔信号的独立、同时测量, 具有较高的准确度, 对百皮秒级时间间隔测量的精度优于 12 ps, 百纳秒级测量精度优于 17 ps, 微秒级测量精度优于 31 ps, 秒级测量精度优于 80 ps, 测量范围可达 1.6 s。能够满足绝大多数场景下对时间间隔测量设备的性能要求。

关键词: 时间间隔测量; 高精度; 多通道

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2023-01-0008-13

Design and implementation of multi-channel and high precision time-interval counter

LIU Ke-wei^{1,2}, JING Wen-fang^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In time-frequency area, to meet the requirement of high precision time comparison, high precision time interval measurement of four-channel parallel input signals is realized by combining MCU (micro controller unit) and TDC (time-to-digital conversion) chip. The principle of time interval measurement, system implementation method (hardware composition and software design), error treatment and system performance evaluation index are discussed in details, and a test platform is built to test the equipment performance. The test results show that the system can realize the simultaneous and independent measurement of the four-channel time interval signals with high accuracy. The measurement accuracy of time interval measurement is better than 12 ps at hundred picosecond level, better than 17 ps at hundred nanosecond level, better than 31 ps at microsecond level, better than 80 ps second level, and the measuring range can reach 1.6 s. It can meet the performance requirements of time interval measurement equipment in most scenarios.

Key words: time-interval measurement; high precision; multi-channel

0 引言

短时、高精度时间间隔测量技术被广泛应用于空间科学、高能物理、激光测距、时频传递以及导航定位领域^[1]。随着科学技术的发展,相关应用领域对时间间隔测量设备的通道数、测量精度、测量范围等功能和性能指标提出了更高要求^[2]。目前,市面上存在一些商用的时间间隔测量设备,如 SRS 公司^[3]研发的通用时间间隔计数器 SR620,单次测量有效数字为 4 ps,分辨率为 25 ps,但只有两个测试通道,不具备多通道测试能力,GuideTech 公司^[4]生产的 GT210 和 GT668 系列产品,测量分辨率可以达到 0.9 ps,但是价格昂贵。除商用设备外,相关文献对时间间隔测量方法进行了研究。西安电子科技大学^[5]使用 FPGA (field programmable gate array) 和游标延迟线法实现了 38 ps 测量精度的时间间隔测量,测量精度有待提高;中国科学院国家授时中心陈法喜等人^[6]研制的皮秒级 16 通道精密事件计时器,测量分辨率优于 5 ps,测量稳定度优于 0.6 ps,但设备体积较大。侯志军等人^[7]设计的时间间隔计数器,具备多通道测量能力,测量精度可达 20 ps,但只给出了单一时间间隔的测量精度,未能对设备性能进行充分验证。

本文采用 MCU (microcontroller unit) 和 TDC (time delay controller) 芯片相结合的方法设计了一款四通道时间间隔测量设备,具备多通道、高精度、大量程测量能力。在现有研究基础上,通过优化测试方法,对各通道的系统误差进行标定和补偿,并对通道一致性和不同量级时间长度的测试精度进行了充分测试与验证。该设备体积小、成本低、配置灵活,能够满足绝大多数应用场景。

1 时间间隔测量原理

随着测试测量技术的不断发展,时间间隔测量从模拟测量到数字测量,已发展出多种成熟的测量技术。应用较多的测量方法主要有直接计数法、游标法、抽头延迟线法和差分延迟线法^[8]。直接计数法采用对参考时钟脉冲直接计数的方式实现待测时间的测量,具有测量范围大,易于实现的特点,其局限性在于分辨率低^[9]。其他几种方法主要用于小测量范围 (10~200 ns) 的测量,测量精度高^[10]。在实际系统实现中,常常将几种方法结合使用,在保证测量精度的同时,使仪器具备大范围测量的能力^[11]。

为使仪器具备大范围,高精度的测量能力,本设计采用“粗测”加“细测”的二次内插测量方法。“粗测”通过对参考时钟脉冲直接计数的方式得到待测时间间隔的粗值,“细测”部分采用抽头延迟线法得到精细测量结果。系统多通道时间间隔测量原理如图 1 所示^[12]。

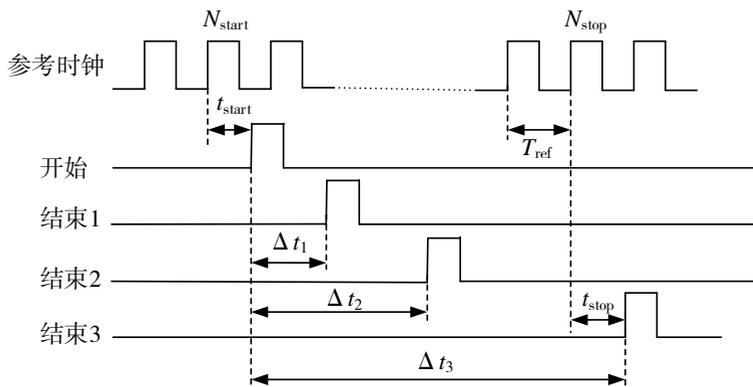


图 1 多通道时间间隔测量原理图

参考时钟为时间测量单元提供稳定的时基参考。四通道输入信号分别作为 1 路开始信号和 3 路结束信号,各通道独立测量,通过数据处理得到开始信号和结束信号之间的时间间隔测量值。以开始信号为例,系统测量开始后,即对参考时钟脉冲进行循环计数,并将计数值进行缓存(FIFO),同时使用抽头延迟线法对相邻脉冲之间的时间间隔进行延迟测量,得到参考时钟周期的精细测量值 T_{ref} 。当开始脉冲到来时,锁存当前参考时钟周期计数值 N_{start} ,同时测量前一个参考时钟上升沿到开始脉冲信号上升沿经过的延迟时间 t_{start} ,并将其所经过的延迟单元的个数 M_{start} 进行锁存, t_{start} 和 M_{start} 之间的关系如式(1)所示,其中 t_{lsb} 为单个延迟单元的延迟时间。根据式(2)计算开始脉冲到达时的系统时间 $t_{\text{sys_start}}$ 。

$$t_{\text{start}} = M_{\text{start}} \times t_{\text{lsb}}, \quad (1)$$

$$t_{\text{sys_start}} = N_{\text{start}} \times T_{\text{ref}} + t_{\text{start}}。 \quad (2)$$

单位延迟时间 t_{lsb} 与参考时钟 T_{ref} 存在如下所示关系:

$$t_{\text{lsb}} = T_{\text{ref}} / R_{\text{DIV}}。 \quad (3)$$

式(3)中, R_{DIV} 为参考时钟的分频系数,也即单个时钟周期内延迟单元的个数。

系统时间 $t_{\text{sys_start}}$ 可以表示成如下形式:

$$t_{\text{sys_start}} = (N_{\text{start}} + \frac{M_{\text{start}}}{R_{\text{DIV}}}) \times T_{\text{ref}}。 \quad (4)$$

结束信号到达时,用同样的方法得到其系统时间 $t_{\text{sys_stop}}$ 。两个系统时间的差值即为开始信号和结束信号之间的时间间隔 Δt ,如式(5)所示:

$$\Delta t = t_{\text{sys_stop}} - t_{\text{sys_start}} = (N_{\text{stop}} + \frac{M_{\text{stop}}}{R_{\text{DIV}}}) \times T_{\text{ref}} - (N_{\text{start}} + \frac{M_{\text{start}}}{R_{\text{DIV}}}) \times T_{\text{ref}}, \quad (5)$$

式(5)中, N_{start} 和 N_{stop} 为“粗”计数值,与参考时钟有关,通过改变参考时钟频率,可以拓展测量范围,当参考时钟为 10 MHz 时,测量范围可达 1.6 s。 M_{start} 和 M_{stop} 为抽头延迟线法得到的精细测量值,通过配置参数 R_{DIV} ,改变延迟单元的个数和单位延迟时间,提高测量分辨率。“粗测”和“细测”相结合的测量方式实现了测量范围的灵活可配,同时提高了系统的测量精度。

2 系统设计

系统设计包括硬件设计和软件设计。硬件设计基于系统功能和性能指标完成芯片选型,主控单元与各模块之间通信接口的设计,以及输入通道和供电模块等外围电路的设计。软件设计在硬件设计的基础上,完成各模块芯片的寄存器配置、信号的测量、数据的存储、读取以及处理。

2.1 系统硬件设计

为满足系统多通道、高精度时间间隔测量的要求,本系统采用 MCU 和 TDC 芯片相结合的实现方式,系统硬件框图如图 2 所示,主要包括微处理器单元、时钟分配单元和时间测量单元。

微处理器单元采用 ATMEL 公司的 ATxmega 主控芯片,通过 SPI 总线与时钟分配单元和时间测量单元进行通信,实现芯片配置,测量控制等控制功能,同时进行数据处理得到时间间隔测量值,通过 UART 发送到外部接收设备。时间测量单元完成 4 路待测信号的时间-数字转换,是系统的核心,由 AMS 公司的 TDC-GPX2 芯片及其外围电路构成,该芯片能够提供四输入的独立通道,具备最大 35MSPS 的采样率,

单次测量精度可达 $10\text{ ps}^{[13]}$ ，满足系统性能要求。时钟分配单元为系统内部提供稳定、可靠的时钟参考，保证系统各模块之间的时钟同步，同时便于系统拓展。该模块由 ADI 公司的 AD9516 芯片及其外围电路构成，该芯片内部集成了锁相环（PLL），具有亚皮秒级的抖动性能^[14]。

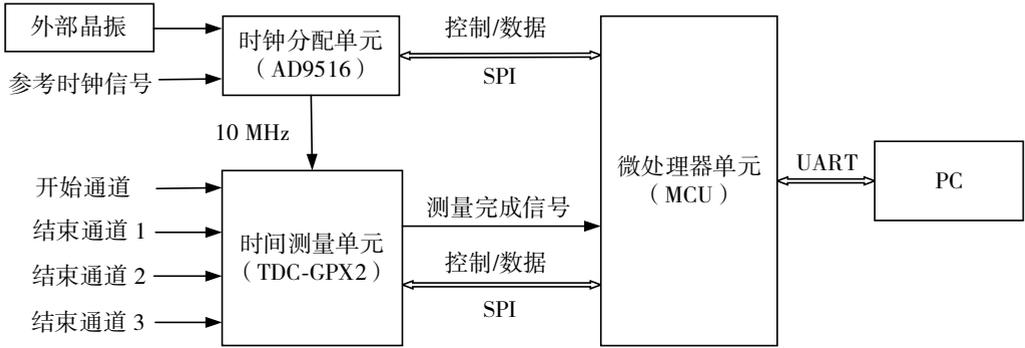


图 2 系统硬件框图

2.2 系统软件设计

系统软件设计采用 C 语言在 MCU 上进行实现，如图 3 所示。系统上电后首先进行初始化，包括系统时钟配置、SPI 初始化以及 UART 初始化。初始化完成后，通过 SPI 总线依次配置时钟分配单元和时间测量单元，并通过读取寄存器参数验证配置正确性，时钟分配单元输出 10 MHz 时钟信号为时间测量单元提供参考时钟。配置完成之后开始测量，每完成一次测量，时间测量单元给 MCU 发送一次测量完成信号，收到测量完成信号后，读取时钟分配单元缓存区获取测量数据，当开始通道和结束通道都有测量数据时，通过数据处理得到时间间隔测量值。最后通过 UART 将测量结果进行输出。

系统的信号测量过程是不断循环往复的，当系统上电之后，任一通道有信号时即开始测量和数据读取，只有当开始通道和结束通道同时有信号输入时，才能通过数据处理得到时间间隔测量数据。

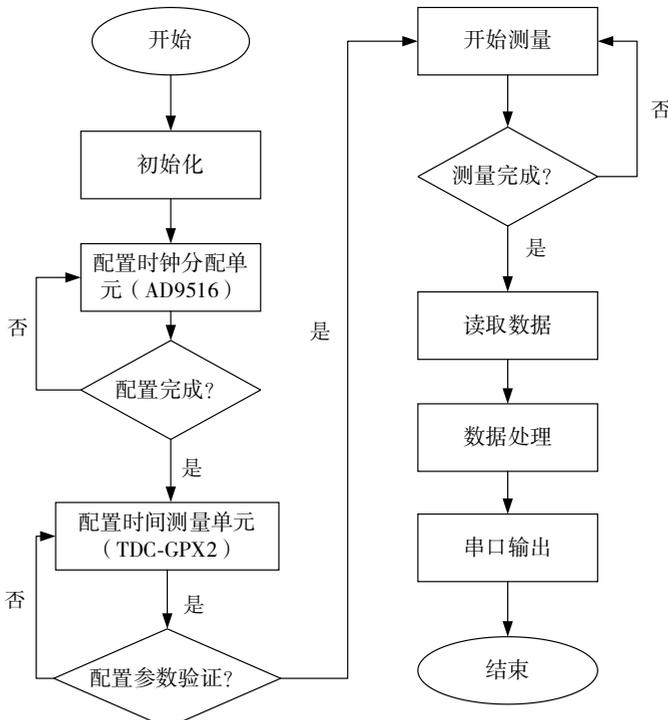


图 3 软件流程图

3 系统测试

3.1 系统性能评价指标

对于时频信号测量仪器，通常用准确度和测量分辨率对设备性能进行评价。准确度指测量值与真值之间的偏离程度，可用式(6)进行表示。测量分辨率可用标准差进行评价^[6]，标准差表达式如式(7)所示^[15-16]。

$$\text{准确度} = |\text{测量值} - \text{真值}|, \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}。 \quad (7)$$

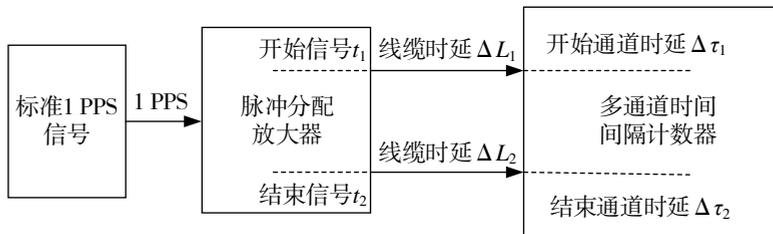
式(7)中， X_i 为测量数据， \bar{X} 为测量数据的均值， N 为测量数据总数。

3.2 通道时延标定

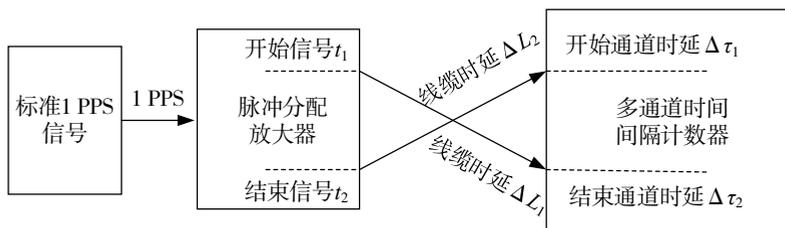
系统在电路设计和硬件实现时，各输入通道到时间测量单元的布局布线无法做到完全一致，导致各输入通道之间存在一定的时延差异，引起系统误差。为使仪器输出的测量结果更加可靠，需要对系统误差进行标定^[17]。

系统测试过程使用的参考时钟由标准时间 UTC (NTSC) 主钟引出的 10 MHz 信号，具有较高的稳定性和准确度，另外系统内部的 AD9516 时钟分配单元，其输出时钟信号的抖动在亚皮秒量级，对系统误差的影响较小。因此，此处只对通道时延引起的误差进行标定。

通道时延标定采用正、反接测试方法，示意图如图 4 (a) 和 (b) 所示^[18]。测试信号采用标准时间 UTC (NTSC) 主钟引出的标准 1 PPS 信号，经脉冲放大器得到两路测试信号，通过线缆连接至多通道时间间隔计数器的开始和结束通道。



(a) “正接”示意图



(b) “反接”示意图

图 4 通道时延标定测试示意图

正、反接时间间隔测量值 Δt_1 和 Δt_2 的表达式分别如式(8)和(9)所示：

$$\Delta t_1 = t_1 + \Delta L_1 + \Delta \tau_1 - (t_2 + \Delta L_2 + \Delta \tau_2), \quad (8)$$

$$\Delta t_2 = t_2 + \Delta L_2 + \Delta \tau_1 - (t_1 + \Delta L_1 + \Delta \tau_2)。 \quad (9)$$

则开始通道和结束通道因路径延迟造成的偏差 $\Delta \tau$ 可由下式计算：

$$\Delta \tau = \Delta \tau_1 - \Delta \tau_2 = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}。 \quad (10)$$

系统参考频率为 10 MHz，时钟周期为 100 ns，为了减少参考时钟对系统误差带来的影响，选取百皮秒级、纳秒级和十纳秒级 3 组典型的时间间隔对系统误差进行测量，将 3 组测量值求平均得到通道时延偏差，测试结果如表 1 所示。通道 1 和通道 2、通道 3、通道 4 之间的通道时延偏差分别为 -12.3、-52.1、20.9 ps。其中，通道 1 和通道 2、通道 3 之间的偏差值为负值，说明通道 1 的时延比其他两个通道小，通道 1 和通道 4 之间的偏差值为正值，说明通道 1 的时延比通道 4 的时延大。将通道时延测试结果整合到软件的数据处理过程中，消除因通道时延引起的系统误差。

表 1 通道时延标定测试结果

单位：ps

量级	通道 1—通道 2	通道 1—通道 3	通道 1—通道 4
百皮秒级	-11.6	-52.1	20.1
纳秒级	-12.7	-50.2	21.8
十纳秒级	-12.5	-54.0	20.7
通道时延偏差	-12.3	-52.1	20.9

3.3 通道一致性测试

对于多通道时间间隔测试系统，不同通道之间独立测量，互不影响。理论上来说，对于同一输入信号，不同通道的测量结果应该保持一致。因此，针对不同通道测试结果的准确度、精度以及波动范围进行一致性测试^[19]。

图 (5) 为通道一致性测试示意图，测试所用 10 MHz 参考时钟和 1 PPS 测试信号由标准时间 UTC (NTSC) 主钟引出。连接至时间间隔计数器结束通道 (通道 2、通道 3、通道 4) 的 3 条测试线缆 L2、L3、L4 等长，通过调整连接至开始通道 (通道 1) 的测试线缆 L1 的长度，进行不同时间间隔的测量。

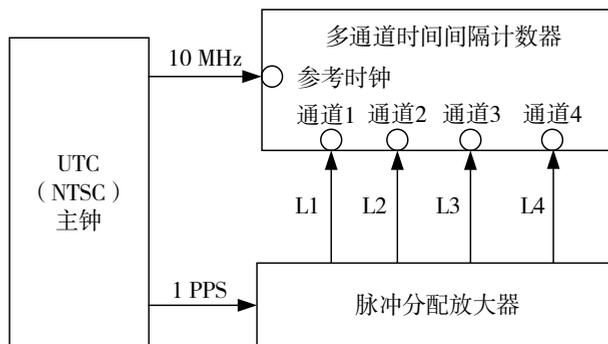


图 5 通道一致性测试示意图

针对百皮秒级、纳秒级以及百纳秒级时间间隔进行测试,测试结果见表 2。由测试结果可知,不同通道测试同一时间间隔数据时,测试结果的均值偏差小于 20 ps、标准偏差差值小于 5 ps,波动范围差值小于 25 ps,说明系统具有较好的通道一致性。

表 2 通道一致性测试结果

单位: ns

量级	通道 1—通道 2			通道 1—通道 3			通道 1—通道 4		
	均值	标准偏差	波动范围	均值	标准偏差	波动范围	均值	标准偏差	波动范围
百皮秒级	0.128	0.009 7	0.097	0.133	0.010 6	0.073	0.127	0.011 6	0.073
纳秒级	5.013	0.011 1	0.084	5.029	0.010 8	0.085	5.021	0.011 2	0.078
百纳秒级	134.618	0.016 2	0.187	134.629	0.016 0	0.185	134.635	0.015 8	0.189

3.4 时间间隔测试

本文采用比较法进行时间间隔测试,使用通用时间间隔测量设备 SR620 进行对比测试^[20]。

图 6 为时间间隔测试示意图,标准时间 UTC (NTSC) 主钟引出的 10 MHz 信号经过频率分配放大器为 SR620 和计数器提供时钟参考,1 PPS 信号经脉冲分配放大器得到两路测试信号,然后经过三通分别送至计数器和 SR620。其中线缆 L3 和 L3' 等长, L4 和 L4' 等长。经测试,计数器的触发电平为 1.41 V,将 SR620 的触发电平设置为相同值,与计数器保持一致。

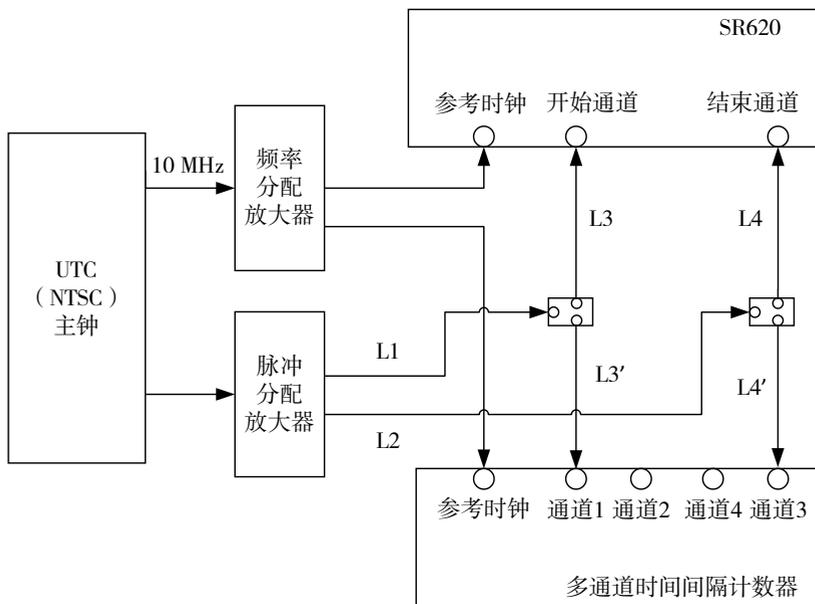
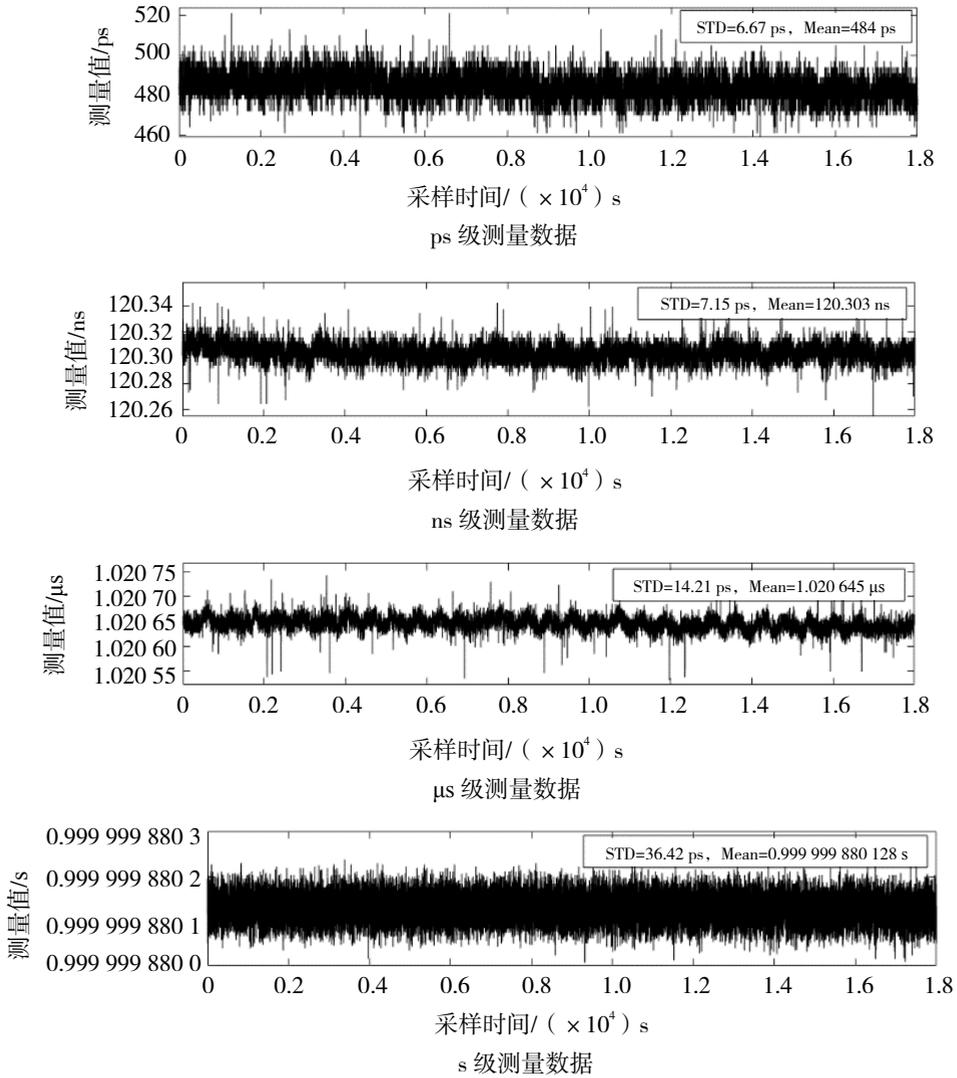


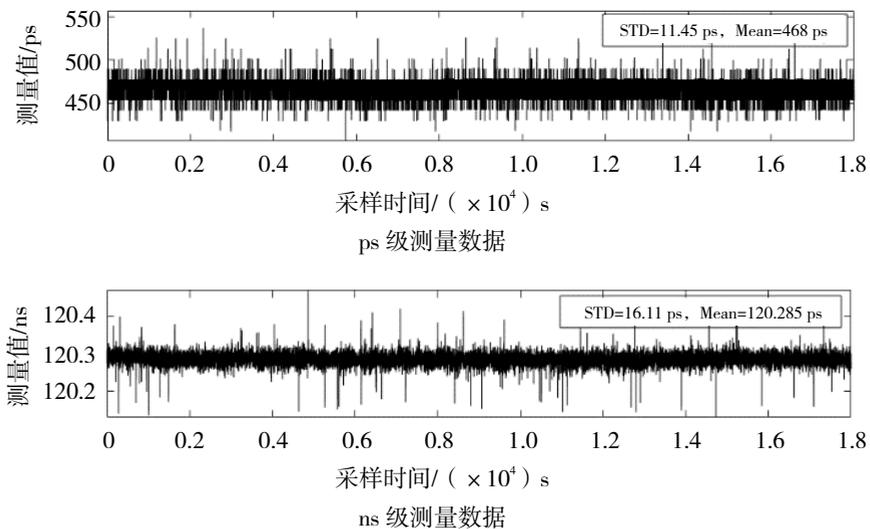
图 6 时间间隔测试示意图

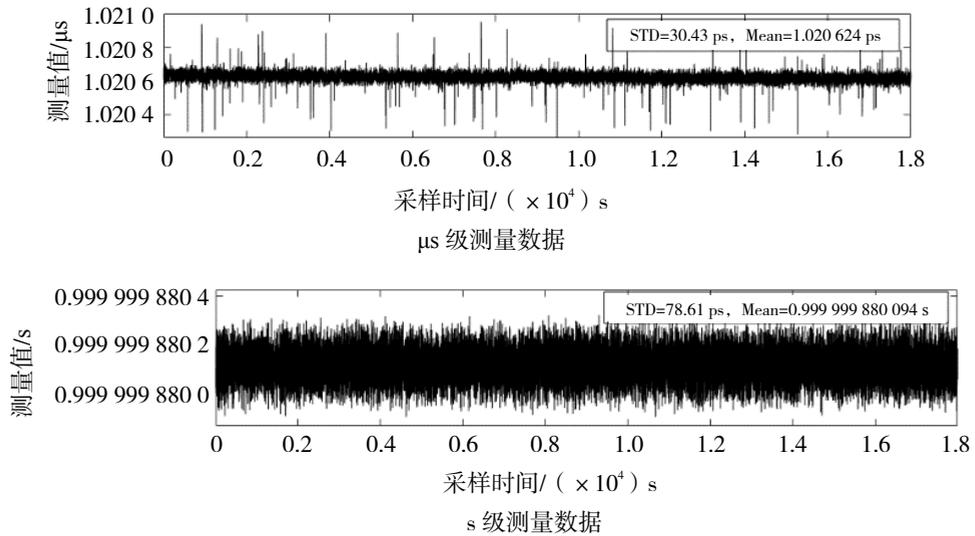
为充分验证时间间隔计数器的性能,针对不同时间间隔进行对比测试,通过调整连接至结束通道的测试线缆 L2 的长度,进行不同时间间隔的测量。测试结果如图 7 和表 3 所示。图 7 给出了两台设备在不同时间间隔下 5 个小时的测试结果。可以看出,在测试时间内,SR620 和计数器的测试数据整体保持稳定,设计的时间间隔计数器具有较好的稳定性,能够满足长时间测量要求。由表 3 可知,与 SR620 相比,设计的时间间隔计数器在皮秒级、纳秒级、微秒级、秒级测量误差分别为 16、18、21、34 ps,具有较高的准确度。测量结果的波动范围相对较大,导致其测量精度略逊于 SR620,但已然具有较高的测量

精度。其百皮秒级、百纳秒级、微秒级、秒级测量精度分别为 11.45、16.11、30.43、78.61 ps，能够满足大多数应用场景。



(a) SR620 测试数据





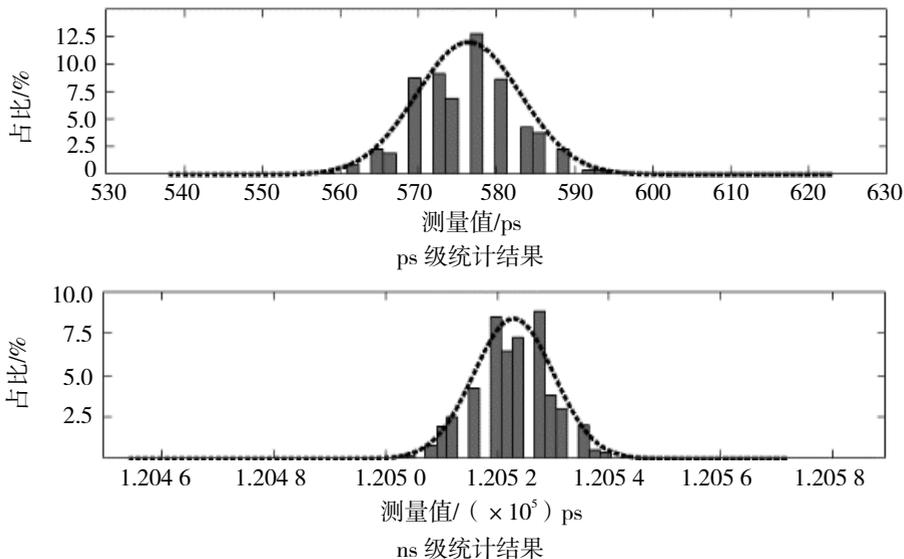
(b) 计数器测试数据

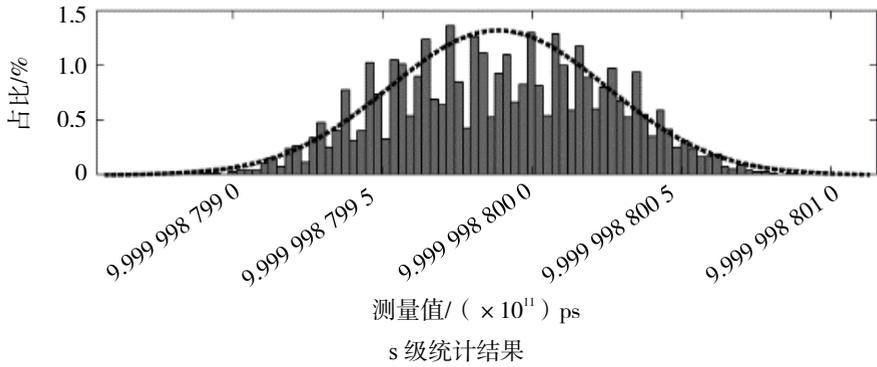
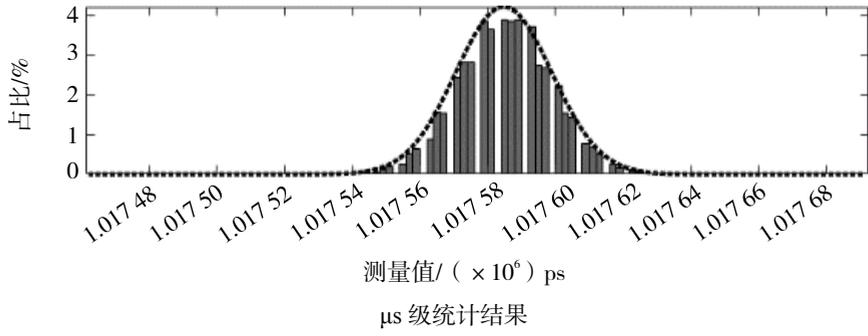
图 7 SR620 和计数器测试数据

表 3 SR620 和计数器对比测试结果

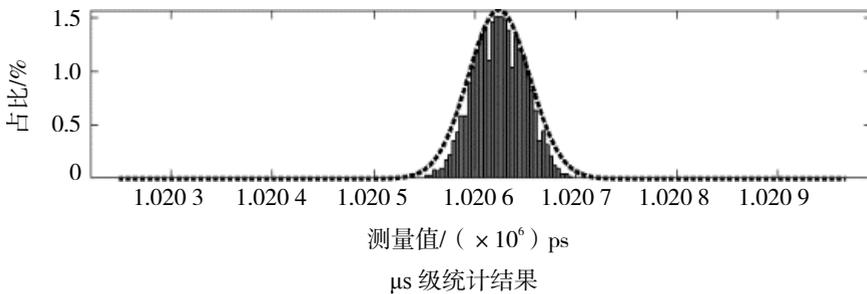
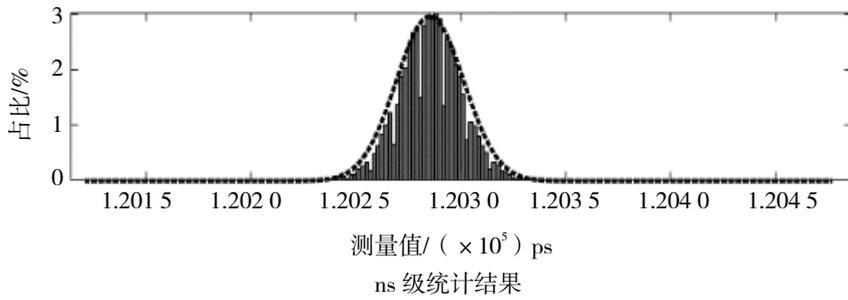
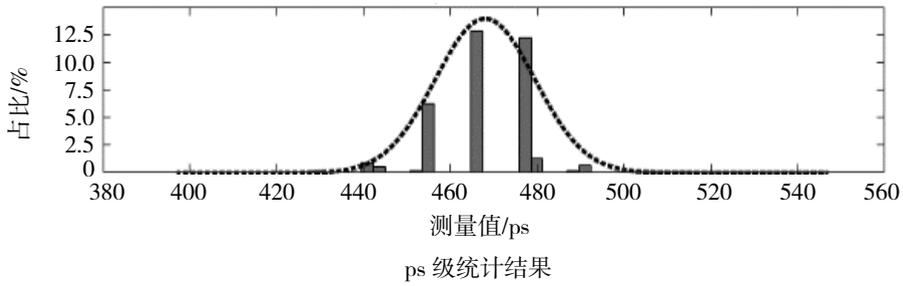
量级	SR620			计数器		
	均值	标准偏差 /ps	波动范围 /ns	均值	标准偏差 /ps	波动范围 /ns
百皮秒级	484 ps	6.67	0.065	468 ps	11.45	0.130
百纳秒级	120.303 ns	7.15	0.098	120.285 ns	16.11	0.337
微秒级	1.020 645 μs	14.21	0.209	1.020 624 μs	30.43	0.699
秒级	0.999 999 801 28 s	36.42	0.236	0.999 999 880 094 s	78.61	0.469

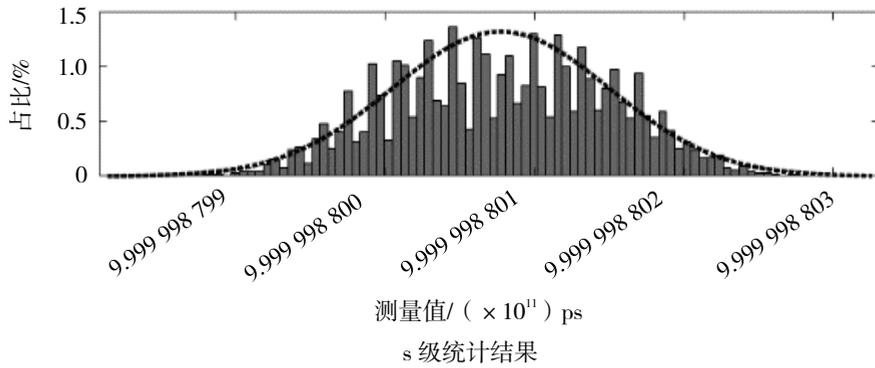
对 SR620 和设计的時間间隔计数器的测量数据进行统计分析，得到的概率密度直方图如图 8 所示。由于测试信号是通过线缆和三通连接至待测设备和 SR620 上，测试线缆长度的不完全一致以及三通导致 SR620 和计数器测试的均值存在 20 ps 左右的偏差。由图 8 统计结果可知，针对不同量级的時間间隔，SR620 和设计的時間间隔计数器的测量结果较为集中，呈标准的正态分布，与图 7 的测量结果一致。说明设计的時間间隔计数器，其测量结果主要受随机误差的影响。





(a) SR620 统计结果

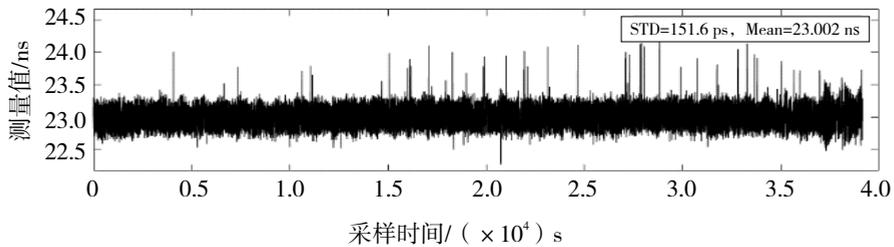




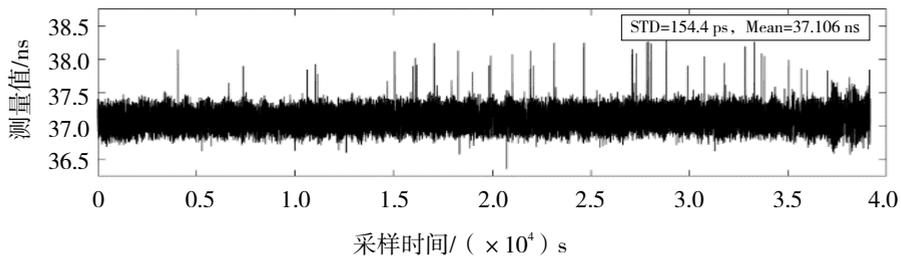
(b) 计数器统计结果

图 8 SR620 和计数器统计结果

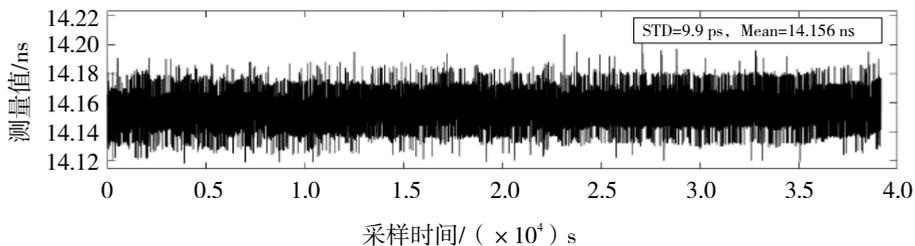
测试示意图如图 6, 进一步对通道 1 和通道 3 的精细测量结果以及两通道间的时间间隔测量结果进行统计分析, 得到的测量值和概率密度直方图如图 9 所示。由图 9 可知, 通道 1 和通道 3 精细测量值的标准差分别为 151.6 ps 和 154.4 ps, 两通道间的时间间隔测量值的标准差为 9.9 ps, 通过不同通道测量结果相减的方式得到待测时间间隔, 抵消掉了各通道间的公共误差, 使得时间间隔测量值的标准差优于各通道测量值的标准差。另外, 图 9 时间间隔测量的均值为 14.156 ns, TDC-GPX2 芯片手册上给出的百纳秒内时间间隔测量的标准差为 9.3 ps^[13]。说明设计的时间间隔计数器的测量精度与芯片手册上给出的测量精度相同。



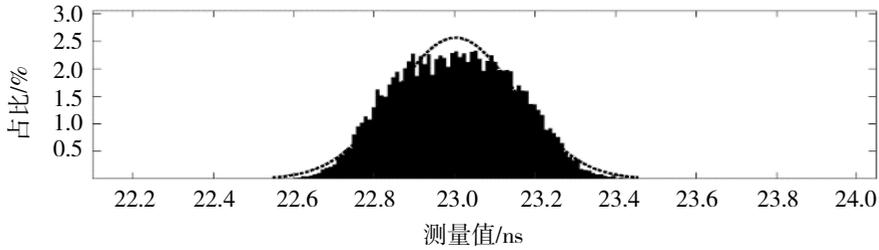
(a) 通道 1 精细测量值



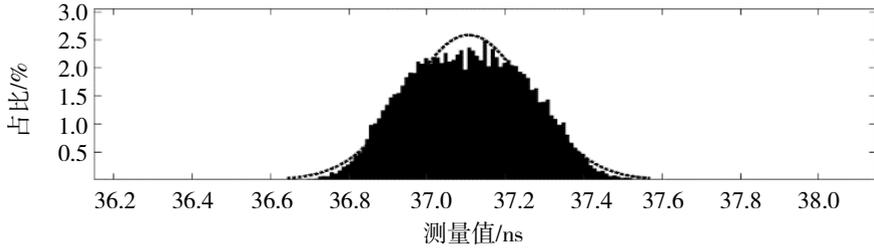
(b) 通道 3 精细测量值



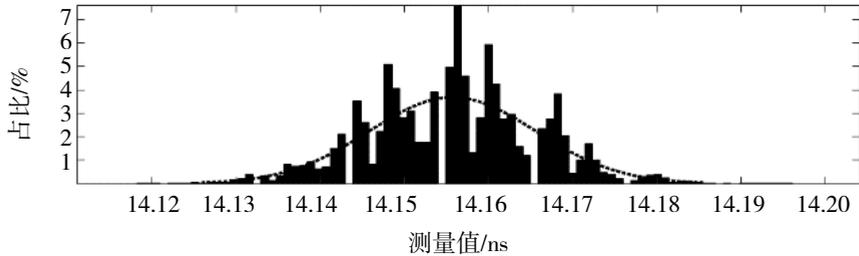
(c) 通道 1 和通道 3 时间间隔测量值



(d) 通道 1 精细测量统计结果



(e) 通道 3 精细测量统计结果



(f) 通道 1 和通道 3 时间间隔测量统计结果

图 9 计数器精细测量结果

4 结论

本文采用 MCU 和 TDC 芯片相结合的方式, 设计并实现了 4 通道高精度时间间隔计数器。实测结果表明, 该设备能够进行多通道独立、同时测量, 测量范围可达 1.6 s, 百皮秒级测量精度优于 12 ps, 百纳秒级测量精度优于 17 ps, 微秒级测量精度优于 31 ps, 秒级测量精度优于 80 ps, 满足大量程、多通道、高精度的设计要求, 能够适应大多数应用场景。但本文未对时基误差、触发器误差等误差源进行分析和处理, 测量精度仍有提升空间。

参考文献:

- [1] WANG Hai, ZHANG Min, LIU Jie. High-resolution short time interval measurement system implemented in a single FPGA chip[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(12): 1285-1290.
- [2] 赵志雄, 李孝辉, 刘娅, 等. 基于 PCI 总线的高精度大量程时间间隔计数器研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1317-1324.
- [3] Stanford Research System. SR620 Universal Time Interval Counter Manual[M]. America: Stanford Research System, 2006.
- [4] 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.

- [5] 王海, 周渭, 刘畅生, 等. 一种新的短时间间隔测量方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2): 267-271.
- [6] 陈法喜, 孔维成, 赵侃, 等. 皮秒级 16 通道精密事件计时器研制[J]. 时间频率学报, 2020, 43(2): 85-93.
- [7] 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.
- [8] 邹进波. 基于 FPGA 的精密时间间隔测量研究与实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [9] 辜新宇, 郭际, 施韶华, 等. 多通道精密时间间隔测量系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 69-75.
- [10] KALISZ J. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution[J]. Metrologia, 2004, 41(1): 17-32.
- [11] 孟升卫. 高速精密时间间隔测量及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [12] 施韶华, 李孝辉, 张慧君. 基于 TDC-GPX 的多通道时间间隔测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(z10): 252-256.
- [13] AMS Corporation. TDC-GPX2 Datasheet[K]. AMS Corporation, 2016.
- [14] ADI Corporation. AD9516-0 Datasheet[K]. ADI Corporation, 2007.
- [15] 李雨薇. 精密时频信号产生与性能评估方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [16] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] 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(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [18] HAMZA G G. Time interval measurement in the picosecond accuracy[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2019, 62(6): 778-784.
- [19] 张云雷, 张珂殊, 邵永社, 等. 基于 FPGA 的时间数字转换电路设计与测试[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(8): 155-178.
- [20] 叶超, 冯莉, 欧阳艳晶. 精密时间间隔测量仪数据校准和不确定度测试[J]. 理论与方法, 2008, 27(12): 14-25.