

飞秒稳定度事件计时器设计及激光时间比对应用

吴志波^{1,2}, 邱渡裕³, 汤 凯¹, 孟文东^{1,2}, 林海声⁴, 肖爱民⁵, 高帅和⁶, 张忠萍^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏南京 210008; 3. 电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 610054; 4. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444; 5. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 6. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600)

摘要: 事件计时器可实现输入事件时刻的高精度、高稳定测量,且工作频率不受测量间隔限制,是星地激光时间比对中不可或缺的设备. 为满足飞速发展星载原子钟的评估要求,对星地激光时间比技术中激光发射、到达和返回时刻的测量提出亚飞秒稳定度和皮秒精度需求. 采用FPGA配合计时芯片THS788开发了高精度事件计时器,测量精度约8 ps,非线性误差皮秒级,测量频率大于10 kHz;将基准时钟分频后作为校准信号,实现时延漂移的实时标校,时刻测量稳定性提升5倍以上. 将该计时器应用在星地激光时间比对载荷,载荷测量稳定性(Time DEVIation, TDEV)优于0.07 ps@300 s和0.84 ps@1 day. 计时器达到国际主流产品A033-ET水平,既满足 10^{-18} 量级准确度原子钟的时频传递需求,又可用于毫米级精度卫星激光测距,具有较好的推广应用价值.

关键词: 卫星激光测距;激光时间比对;事件计时器;皮秒;测量稳定性

基金项目: 国家自然科学基金(No.12003056, No.11903066)

中图分类号: TH75

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)08-2152-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220299

Design of Event Timer with Femtosecond Stability and Its Application in Laser Time Transfer

WU Zhi-bo^{1,2}, QIU Du-yu³, TANG Kai¹, MENG Wen-dong^{1,2}, LIN Hai-sheng⁴, XIAO Ai-ming⁵,
GAO Shuai-he⁶, ZHANG Zhong-ping^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Science, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

3. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

4. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

5. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

6. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China)

Abstract: The event timer can realize high-precision and high-stability measurement of the input event time, and the operating frequency is not limited by the measurement interval. It is an indispensable device for satellite-to-ground laser time transfer. In order to meet the evaluation requirements of the rapid development of spaceborne atomic clocks, sub-femtosecond stability and picosecond accuracy are proposed for the measurement of laser emission, arrival and return epochs in the laser time transfer technology. A high-precision event timer is developed by using FPGA and timing chip THS788. Its measurement accuracy is about 8 ps, the nonlinear error is less than 1 ps, and the measurement frequency is greater than 10 kHz. The reference frequency divided signal is used as the calibration signal to realize the real-time calibration of the delay drift and 5 times of improved measurement stability, so that the time deviation (TDEV) is better than 0.07 ps@300 s and 0.84 ps@1 day which applied in payload of China space station. The performance of the developed event timer reaches the level of the international mainstream product A033-ET, which not only meets the time-frequency transfer requirements of atomic clocks with 10^{-18} level accuracy, but also can be used for millimeter-level precision satellite laser ranging, which has good promotion and application value.

Key words: satellite laser ranging (SLR); laser time transfer (LTT); event timer (ET); picosecond; time deviation (TDEV)

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.12003056, No.11903066)

1 引言

相比微波,激光信号具有抗干扰强、频率高、传输过程时延量少和测量精度高等特点,采用激光信号作为信号载体可实现更高精度和准确度的时间频率测量,因此,在现有的各种时间比对技术中,激光时间比对被公认为测量精度最高,应用前景十分诱人.激光时间比对技术以窄脉宽激光脉冲为媒介,并利用高精度卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术来实现星地钟或远距离地面钟的时间比对,测量精度高达皮秒量级^[1],测量稳定性可优于 10^{-18} ,是理想的时间比对工具^[2-4],可用于大型设施远程时间同步、微波时间比对外部校核、系统误差及稳定性标定、分析设备时延信息及评估卫星钟稳定性等指标.

星地激光时间比对链路由星载设备和地面测量系统组成.星载设备主要由星载探测器、计时器和激光反射器组成^[5].星载探测器用于地面测量台站上激光脉冲的高精度光电转换并交由计时器测量;星载计时器则基于星载时钟频率基准,精确记录上行激光脉冲到达卫星时刻;激光反射器将上行激光脉冲原路反射回到地面测距站以获取星地距离.地面测量系统为卫星激光测距系统,发射激光用于测量星地间距离,并提供精确的激光发射时刻.

星地激光时间比对的钟差测量模型主要由3个测量时刻量(激光发射、激光到达和激光返回时刻)及一些模型修正量组成.随着各种修正模型理论的日趋完善,提高3个时刻的测量稳定性将成为提升整个链路性能的最主要途径.目前,原子钟频率稳定度发展优于 10^{-18} ,甚至更好,尤其是新一代光钟的迅速发展,对激光时间比对技术的性能提出了苛刻要求.为满足应用需求,对事件计时器的时刻测量稳定性(Time Deviation, TDEV)要求达到亚皮秒甚至飞秒.然而,温度或者电压变化可能引起系统延时(包括输入和时钟本身)的改变,造成稳定性下降.为此,设计适用于星地激光时间比对的事件计时器时,除了实现高精度,还需要考虑延时的实时校准功能.

事件计时器与传统时间间隔计时器不同,其测量输入信号的发生时刻而不是时间间隔,测量频率也不受测量间隔限制,可应用于高重复率的时间频率测量领域.事件计时器一般采用FPGA(Field Programmable Gate Array)结合TDC(Time-Digit Converter)实现,分别用于完成发生时刻中粗计时和精密计时,TDC的器件水平一定程度上决定了事件计时器的性能.目前使用较多的事件计时器产品为拉脱维亚生产的A033-ET,它

已经被装配在全球几十个SLR台站的多数以及其他领域,测量精度优于3 ps,测量频率大于10 kHz,性价比高^[6].此外,还有法国Dassault、德国ACAM的TDC-GPX以及美国Guidetech公司的GT668等事件计时器,测量精度最高可达1 ps,但价格较为昂贵,性价比不高,使用范围较为有限^[7].国内事件计时器技术发展较慢,目前公开报道的测量精度最好为50 ps左右^[8],为实验室产品.上述事件计时器的测量精度和测量频率均较大,仅可满足当前SLR技术的需求,但由于未有时延校准措施,对星地激光时间比对所要求的飞秒稳定度仍不满足.

本文采用TI公司的THS788芯片开发事件计时器,该芯片具有4个独立通道,测量精度优于8 ps,测量频率高达200 MHz,非线性误差低于 $1 \text{ ps}^{[9]}$.时钟基准分频后产生校准信号,使用独立的校准通道测量其延时变化,实现了事件计时器延时漂移的实时标校,稳定性提升了5倍以上.本设计应用在星地激光时频传递载荷,载荷测量稳定性优于 $0.07 \text{ ps}@300 \text{ s}$ 和 $0.84 \text{ ps}@1 \text{ day}$.本计时器的性能已达到国际主流产品A033-ET水平,且更稳定和小型化,既能满足 10^{-18} 稳定度原子钟频率的激光时间比对需求,又可用于毫米级精度卫星激光测距,具有较好的推广应用价值.

2 星地激光时间比技术

星地激光时间比对链路分为地面激光测距系统和星端载荷两部分组成,其中,星端载荷主要包括激光反射器、单光子探测器和皮秒事件计时器,分别用于测距、光电转换和计时.星地激光时间比对的时序框图如图1所示.地面激光测距系统以地面时钟为基准,在 T_0 时刻向卫星发射激光;星载单光子探测器完成上行激光脉冲光电转换后,计时器以星载时钟为基准,在 T_1 时刻探测到上行激光脉冲.与此同时,星载激光反射器将部分激光反射回地面,地面激光测距系统以地面时钟为基准,在 T_2 时刻探测到激光返回脉冲(回波).地面站发射激光脉冲与地面时钟起点1PPS(秒信号)的时间间隔 T_G ,和到达卫星的激光脉冲与星载时钟起点1PPS的时间间隔 T_S ,分别由地面和星上的计时器所测量,上行激光飞行时间 τ_{up} 通过地面站测量的激光往返时间 τ 经修正后可得.据此,可以计算获得星地时钟的钟差 ΔT 及漂移情况,用于星地时间比对、时频传递和星载钟性能评估.

星地激光时间比对获取钟差的基本形式如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \tau_{\text{up}} - T_{\text{S}} - T_{\text{G}} + \varepsilon \\ &= \frac{T_{\text{r}} - T_{\text{e}}}{2} - T_{\text{S}} - T_{\text{G}} \\ &\quad + \frac{\varepsilon_{\text{Sag}}}{2} + \varepsilon_{\text{Rel}} + \varepsilon_{\text{Atm}} + \varepsilon_{\text{Sat}} + \varepsilon_{\text{Reg}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ε 为仪器误差、大气延时、卫星速度畸变和相对论效应等误差校正项; ε_{Sag} 为地球自转引起的 Sagnac 效应改正项; ε_{Rel} 为相对论改正项; ε_{Atm} 为大气折射改正项; ε_{Sat} 为星载设备改正项, 包括单光子探测器和激光反射器参考点归算、星载事件计时器误差校正和光电信号转换时延校正等; ε_{Reg} 为地面激光测距系统设备时延校正项, 包括将激光发射时刻 T_{e} 和激光回波时刻 T_{r} 归算到地面站望远镜的相位中心的时延标校以及线缆时延校正等。

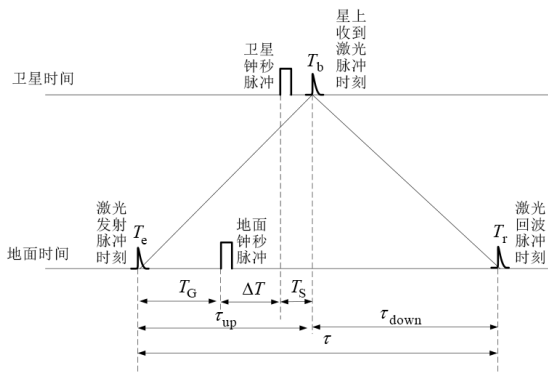


图1 星地激光时间比对应序图

传统时间间隔计数器要实现时刻的测量比较困难, 且测量频率受限于测量间隔。因此, 目前, 时刻的测量特别是频率比较高的情况下均采用事件计时器完成, 如法国 T2L2、欧空局的 ELT 等激光时间比对工程, 国际上高重复率 SLR 也基本采用事件计时器计时。

对于 Sagnac、相对论等修正项, 随着理论模型的不断完善, 误差和稳定性将越来越小, 因此, 提高激光时间比对钟差测量精度或稳定性的关键就在 3 个时刻的测量精度和稳定性。高稳定度事件计时器将是星地激光时间比对的关键技术之一。

3 事件计时器原理

不同于时间间隔计时器的直接计数测量, 事件计时一般采用插值法, 将事件发生时刻分为大数部分和精细部分, 大数部分利用普通粗计数器进行测量, 而精细部分则利用高精度时间间隔测量器件 TDC 获取。

测量事件发生时刻的原理如图 2 所示, 其中 T_{epo} 为事件发生(用信号上升沿表示)的时刻, 如果基准时钟的周期为 T , 则

$$T_{\text{epo}} = N \times T + \Delta t_1 \quad (2)$$

其中, N 为粗计数器中所记录的时钟周期数, 起点为计时开始信号, 一般为外部同步信号 1PPS。

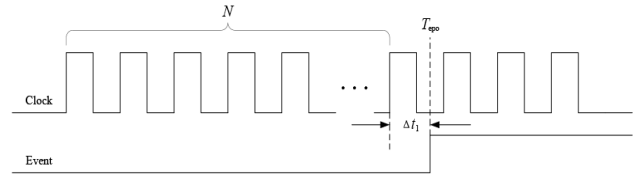


图2 事件计时器工作原理

TDC 器件是事件计时器的核心, 实现方法可分为模拟与数字两大类。模拟方法需要模数转换过程, 如时间间隔扩展法和时间-幅度转换法, 存在对环境温度十分敏感、转换时间较长以及容易受外界扰动影响等问题。拉脱维亚的 A033-ET 就采用了时间-幅度转换方法。数字方法不需要模数转换过程, 可以实现从时间到数字的直接转换, 如游标法、抽头延迟线法, 以及差分延迟线法或称游标延迟线法。近些年, 随着半导体技术的提升和数字电路设计的日益成熟, 数字方法在芯片上更容易集成, 渐渐成为事件计时器的主流实现方式。

4 超稳事件计时器设计

为了满足稳定性 10^{-18} 级星载钟的测量要求, 星地激光时间比对对事件计时器对提出亚皮秒甚至飞秒的长期测量稳定性要求。不可避免地, 无论是地面端还是星端, 事件计时器都会面临温度、电压等波动, 进而引起物理延时、频率基准相位等变化, 影响整个事件计时器的测量稳定性。为此, 对事件计时器的设计提出以下要求:

- ①测量通道: ≥ 2 个;
- ②测量精度优于 10 ps;
- ③测量频率大于 10 kHz;
- ④具有延时校准功能;
- ⑤具有时间同步功能;
- ⑥TDEV 优于 0.1 ps@300 s 和 1 ps@1 day。

4.1 关键芯片选型

目前, 市面现有的 TDC 器件包括安捷伦的 Acqiris U1050A-02、德国 MSC Vertriebs 公司的 TDC-10000, 以及 CERN 的 HP-TDC 等。其中德国 Acam 公司的 TDC-GPX 和美国 TI 公司的 THS788 性能最优, 精度均小于 10 ps, 使用较为广泛。相比较而言, GPX 存在非线性误差大、测量频率不够高(测量死区大)以及独立通道数不足等问题^[10]。综合而言, 选用美国 TI 公司的 THS788 芯片较为合适。该芯片的测量频率高达 200 MHz, 单次测量精度优于 8 ps, 且具有 4 个完全独立的测量通道, 单片芯片即可完成通道记录、时间同步、时延校准等多

种功能,减少了多片芯片间的时延误差。

为避免输入信号质量不佳或电平不匹配,造成测量性能下降,在输入端加上了比较整形电路,确保高质量信号进入 TDC 芯片。一方面,比较整形电路作为输入缓冲器,有效防止输入信号中的瞬态噪声损坏后级电路;另一方面,比较整形电路可以对不同类型输入信号进行电平转换,提供 THS788 芯片所支持的标准 LVDS 电平,适应性较好。本设计选用了与 THS788 芯片同一公司(TI)的 LMH7322 高速比较器,其传播时延为百皮秒,抖动为皮秒量级。该比较器采用双电源供电,通过设置参考电压,可以方便实现 LVPECL 和 LVDS 电平的输出。此外,该比较器可通过调整外部串接的电阻值来改变管脚的引出电流,进而获取合适的迟滞电压,这对消除输入信号抖动、提高计时器测量精度以及板级调试都极为有用。

4.2 高稳事件计时器设计

图 3 为事件计时器的设计框图,核心的芯片为 THS788(图中 TMU),此外还包含多个高速比较器、200 MHz 的压控晶振 VCXO、锁相环 PLL、FPGA,以及数据接口电路等。

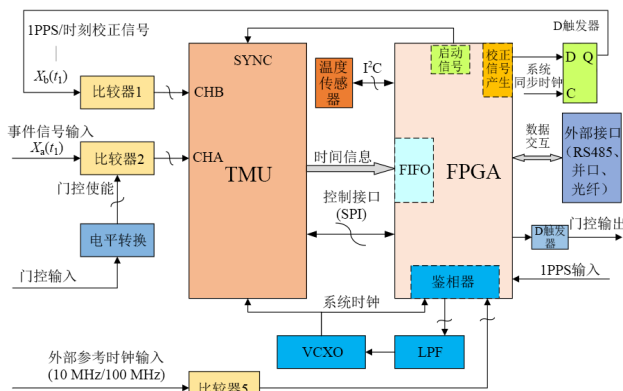


图3 事件计时器设计框图

如第3节所述,事件计时器主要由粗计时和精密计时组成。精密计时测量功能主要由 TMU 通过测量同步信号 SYNC 与输入通道信号之间的时间间隔来完成,粗计时由 FPGA 对 200 MHz 时钟的计数完成。工作频率 200 MHz 由 VCXO 提供,FPGA 内部 PLL 电路通过比较外部频率标准 10 MHz 与 200 MHz 的相位,进而控制 VCXO 电压实现 200 MHz 与外部频率标准的同步,实现高稳定性测量。当外部频率标准没有接入时,事件计时器自动无缝切换到 VCXO 的 200 MHz 工作,具有极好的鲁棒性,也方便调试。

200 MHz 除了给 TMU,还提供给 FPGA,其内部使用一个 34 位长度的计数器,第 20 位用产生的脉冲信号

经 Flip-flop 同步后给 TMU 作为 SYNC 信号(周期为 10.485 76 ms)。计数器的第 33 到 21 位作为粗计时值, TMU 测量结果(SYNC 和通道的时间间隔)为 32 位,最终的事件时刻在 FPGA 内部合成存储,并由接口传输电路发送给上位机。

TDC 芯片本身测量速率理论上可达 200 Mps 以上,为了匹配高速测量,内部设计需要设计一定深度的 FIFO。目前,地面事件计时器选用计算机通用并口传输,其工作在 EPP 模式下,速率可高达 2 MB。单次测量数据为 64 位共 8 个字节,即使 2 个通道同时工作,测量频率可达近 100 kHz,满足 10 kHz 以上测量频率的数据传输需求。对于星载计时器,可以选用卫星标准的 1553B 或者 FC-AE-1553 等接口,同样可以适应 10 kHz 以上的测量频率。

4.3 时延标校设计

除了测量精度和测量速率,高稳定性是激光时间比对技术中事件计时器的另一重要参数。激光时间比对关注测量时刻的稳定性,为此引入了校准通道。具体设计:采用双通道同时测量,分别为测量通道和校准通道。校准通道的输入信号为时钟基准变频信号,其时刻信息已知,将校准通道的实测数据减去已知时刻,即可获得一系列“校准数据”,利用该“校准数据”校正另一通道测试数据,可得到更准确的时刻信息^[11],描述如下:

根据以上定义,若没有误差,则有

$$T_0 = X_b(t_i) - X_b(t_{i-1}) \quad (3)$$

因此,在某一特定时刻的时间误差(即校正信息)为

$$\Delta t_d(t_i) = X_b(t_i) - X_b(t_0) - i \cdot T_0 \quad (4)$$

由式(4)获得的校正信息对测量通道获取的时刻信息进行校正,可得

$$X_{aa}(t_i) = X_a(t_i) + \Delta t_d(t_i) \quad (5)$$

为了最小化通道间(被测通道和校准通道)的时延,每个通道的前端输入电路均设计成相同的比较器电路,选用具有低传播延时特性的 LMH7322 芯片。事实上,本设计用的 TDC 芯片是基于 ECL 技术,本身就具有短延时和低温飘,这些都确保了计时器的延时漂移特性较好。

5 测试结果

为了评估测试研制事件计时器的性能,选用了 4 ps 精度的信号发生器 ETTG-100^[12]产生测试信号,并应用 3 ps 精度的 A033-ET^[13]进行对比测试。图 4 为使用 A033-ET 测试 ETTG-100 产生信号的精度统计图。经测试,信号发生器单通道时刻或双通道间隔的精度均为 4 ps 左右。

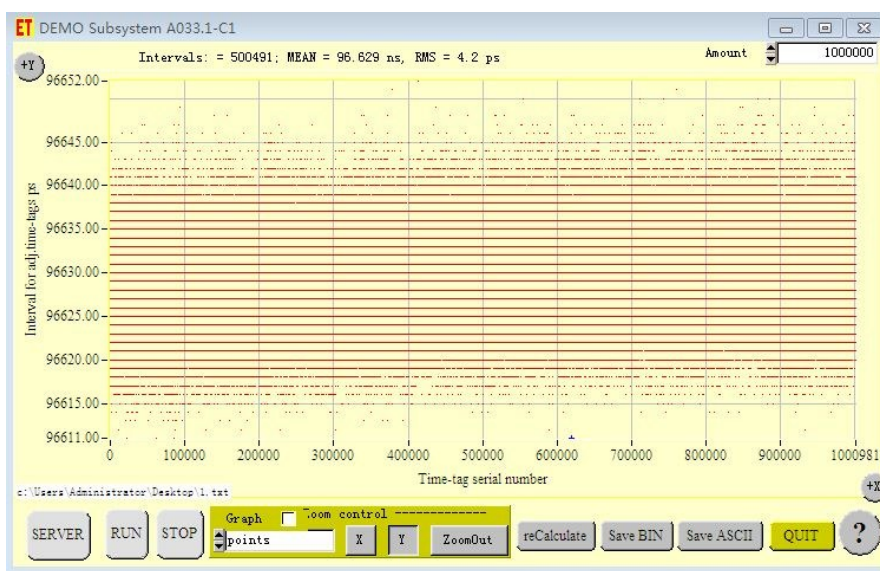


图4 信号发生器ETTG-100输出信号精度统计

5.1 精度和频率评估

使用信号发生器ETTG-100产生10 kHz重复率的测试信号,接入研制事件计时器,记录其相邻时刻间隔,统计测量精度,如图5所示。可以看出,研制事件计时器分辨率为13 ps,测量精度约为8.7 ps,与THS788芯片说明的8 ps精度相符;此外,计时器完成了10 kHz重复率信号的时刻记录,测量频率可大于10 kHz。

5.2 非线性误差评估

非线性误差是评价计时器的重要指标,特别是卫星激光测距涉及近地靶校准与卫星测量。前者间隔一般为100 ns量级,后者则从几毫秒到数百毫秒不等。计

时间间隔测量的动态范围大,非线性误差尤为重要,否则会引起较大的距离偏差。

使用ETTG-100产生多种不同时间间隔(80 ns, 180 ns, 1 μ s, 1 ms和100 ms)的两路测试信号,用来模拟地靶校准、近地星和远地星的距离测量,分别用A033-ET与本文研制的事件计时器进行对比测量,测量结果如表1所示。

从测量结果可以看出,考虑信号源本身精度,本文研制的事件计时器的时间间隔测量精度没有明显比A033-ET差,非线性误差与A033-ET计时器也相当,波动在皮秒级水平。

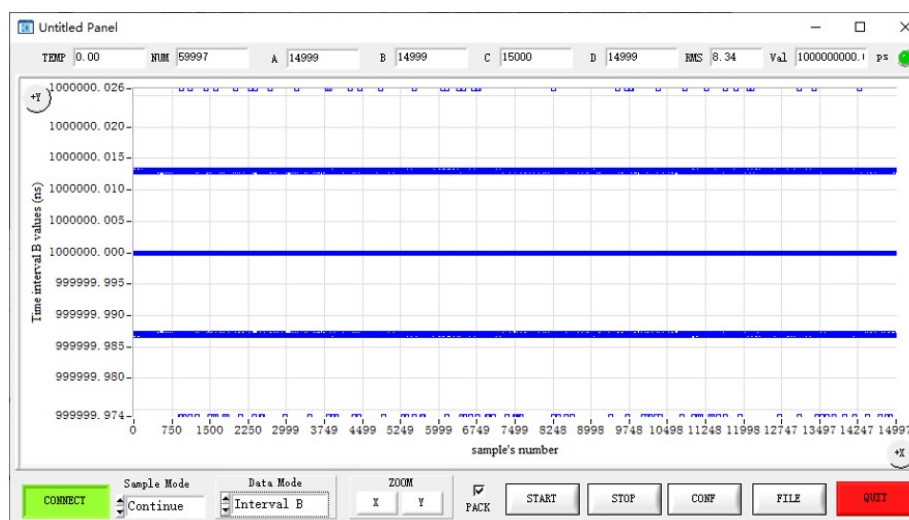


图5 设计事件计时器的测量精度

5.3 时刻测量稳定性评估

如图6所示,将ETTG-100的两路输出(2 kHz频率)

和A033-ET及本文研制被测计时器连接,三套设备均采用共源的10 MHz信号作为频率基准。

表 1 A033-ET与本文研制的事件计时器性能比较

间隔设定值/ ns	A033ET		本事件计时器		间隔差/ ns
	实测尾 数/ns	精度/ps	实测尾 数/ns	精度/ps	
80	79.519	8	79.835	10	0.316
180	79.413	7	79.725	8	0.312
1 080	79.258	8	79.577	8	0.319
1 000 080	79.147	8	79.464	10	0.317
100 000 080	79.225	14	79.544	12	0.319

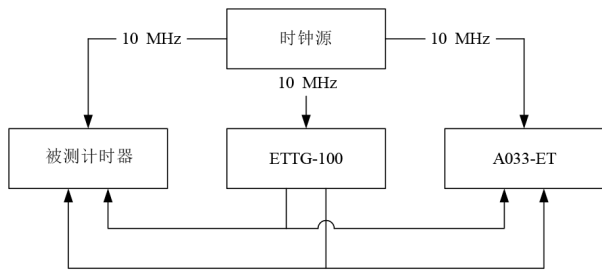


图6 时刻测量稳定性评估框图

首先,对 ETTg-100 和 A033-ET 进行充分预热,可以看到,由 A033-ET 记录的单通道时刻测量值(已归一化,将大的量去掉,保留时刻测量尾数到 10 ps)预热充分后较为稳定,仅在皮秒位略有波动,如图 7 所示。

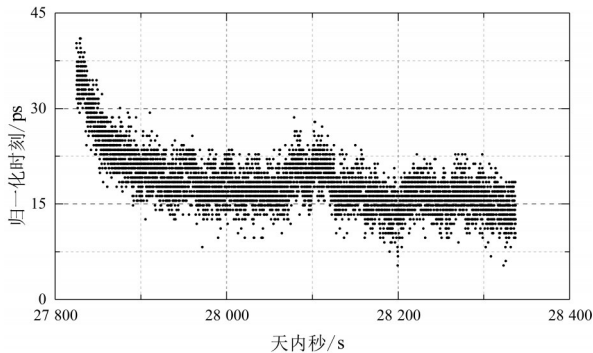
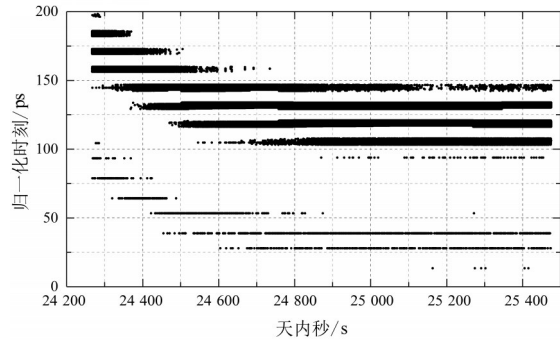


图7 使用 A033-ET 完成的时刻测量稳定性

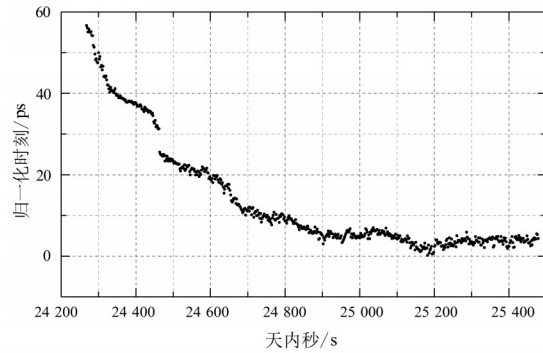
然后,启动本文研制的事件计时器,启动过程中,设备温度将逐步上升直到稳定,正好可以评估温度变化对事件计时器时刻测量的影响,以及采用校准方法后能否更稳定。

设备开启后单通道的测量结果如图 8 所示。由图 8(a) 可知,由于计时分辨率为 13 ps,原始数据不足以体现连续变化,为此每 2 000 点进行平均。平均后的时刻变化如图 8(b) 所示,可以看到,单通道的测量时刻变化较大,预热过程中相差 60 ps,稳定后仍有约 5 ps 波动。

应用校准通道测量数据后的结果如图 9 所示。图 9(a) 为校准后的数据,依旧无法体现变化规律。采取 2 000 点取均值后得到图 9(b),可以看到时刻测量值变

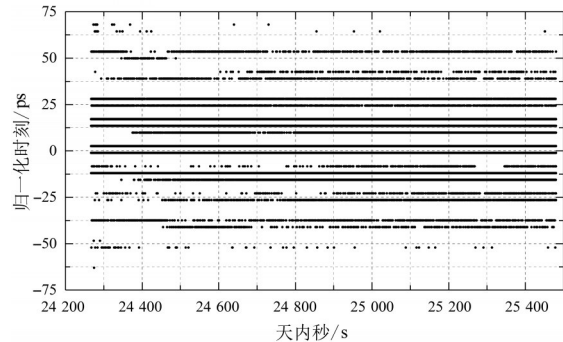


(a) 原始数据

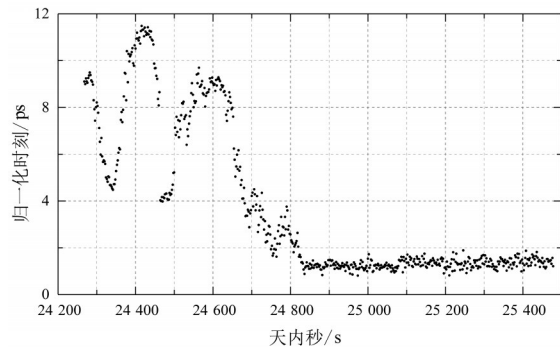


(b) 2 000 点做平均

图8 平均前后的时刻测量稳定性(校准前)



(a) 原始数据



(b) 2 000 点做平均

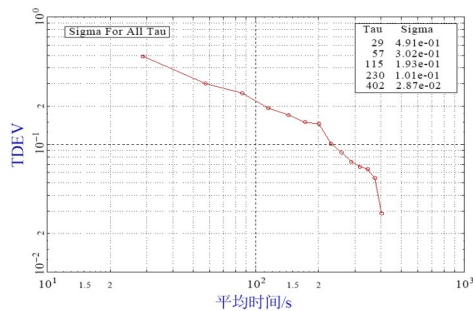
图9 平均前后的时刻测量稳定性(校准后)

化范围压缩到 12 ps 左右,稳定之后波动范围小于 1 ps, 稳定度比校准前提高了 5 倍以上,效果明显.

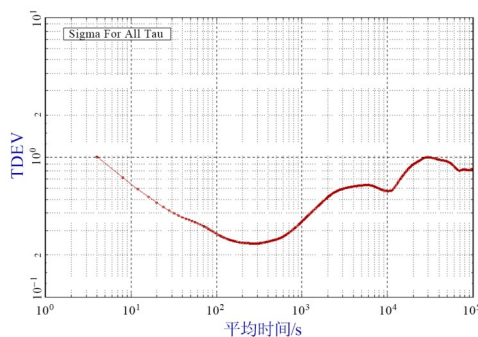
6 激光时间比对应用

激光时频传递载荷是我国空间站的舱外载荷之一,配合地面 SLR 台站系统,完成星地激光时频传递,评估星载原子钟的稳定性. 计时器作为载荷的核心设备,以星载时钟信号为基准,完成上行激光脉冲到达时刻的精确记录. 为了实现高重复率及高稳定度测量,采用本文的事件计时器设计方案.

测试时,采用 10 kHz 重复率、10 ps 脉宽激光作为测试源,整个载荷(包含探测器)的测量稳定性优于 0.07 ps@300 s 和 0.84 ps@1 day,如图 10 所示,有望满足未来 10^{-18} 级星地时频传递和评估需求.



(a) 短期稳定性



(b) 长期稳定性

图 10 激光时频传递载荷测量稳定性(短期和长期)

7 结论

针对星地激光比对和激光测距需求,采用 FPGA 和计时芯片 THS788 设计了事件计时器,测量精度约 8 ps,非线性误差皮秒级,满足毫米级卫星激光测距需求;同时,提出了通道测量时刻校准手段,使时刻测量稳定性提高了 5 倍以上. 成果应用于空间站激光时频传递载荷,使载荷测量稳定性优于 0.07 ps@300 s 和

0.84 ps@1 day,满足未来 10^{-18} 级星地时频传递和评估需求.

致谢 本工作得到中国科学院技术支撑人才项目的资助,在此表示感谢.

参考文献

- [1] ILRS. International laser ranging service[EB/OL]. (2013-04-04)[2022-03-01]. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/index.html>.
- [2] CHOU C, HUME D, KOELEMIEJ J, et al. Frequency comparison of two high-accuracy Al+ optical clocks[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(7): 070802.
- [3] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, et al. An atomic clock with 10^{-18} instability[J]. Science, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [4] CACCIAPUOTI L, ARMANO M, MUCH R, et al. Testing gravity with cold-atom clocks in space[J]. The European Physical Journal D, 2020, 74(8): 164.
- [5] 耿仁方, 吴志波, 汤凯, 等. 高重复率激光时间比对对激光发射时序精确控制[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 135-143.
GENG R F, WU Z B, TANG K, et al. Precise control of laser emission epoch in laser time transfer with high repetition rate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 135-143. (in Chinese)
- [6] 吴志波, 张忠萍, 陈菊平, 等. 事件计时器在卫星激光测距中的应用[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2007(1): 135-141.
WU Z B, ZHANG Z P, CHEN J P, et al. The application of event timer in satellite laser ranging[J]. Annals of Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2007(1): 135-141. (in Chinese)
- [7] 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.
PI X Y, JU Q H, TANG R F, et al. Application of GT668SLR-1 event timer in satellite laser ranging[J]. Astronomical Research & Technology, 2017, 14(4): 429-435. (in Chinese)
- [8] 李祝莲, 熊耀恒. 高精度事件计时器的设计与实现[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2022-2025.
LI Z L, XIONG Y H. Realization and design of high-accuracy event timer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 2022-2025. (in Chinese)
- [9] Instruments Texas. THS788 Quad-Channel Time Measure-

ment Unit (TMU)[R/OL]. [2022-03-01]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/thz788.pdf>.

- [10] BOOLE E, VEDIN V. Potentialities of common-used TDC chips for high-speed event timer design[C]//Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. Poznan: ILRS, 2008: 417-422.
- [11] 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.
RAO Z B. Research and Design of High Precision Event Timer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [12] EVENTECH. Test pulse generator with low jitter ettg-100 [R/OL]. [2022-03-01]. <http://eventechsite.com/en/products/test-pulse-generator-ettg-100>.
- [13] EVENTECH. A033-ET[R/OL]. [2022-03-01]. <http://eventechsite.com/en/products/event-timer-a033-et>.

作者简介



吴志波 男, 1981年出生, 江西临川人. 硕士. 中国科学院上海天文台正高级工程师, 中国科学院技术支撑人才. 主要研究方向为卫星激光测距、空间碎片激光测距、星地激光时间比对等.

E-mail: wzb@shao.ac.cn



邱渡裕 男, 1981年出生, 新疆塔城人. 博士. 电子科技大学享受正高级待遇的高级工程师, 长期从事高速高精度电子测试仪器的研究. 主要研究方向为高速数据采集系统、宽带信号获取技术、高分辨率时间间隔测量等.

E-mail: qiuduyu@uestc.edu.cn



孟文东(通讯作者) 女, 1982年出生, 河北邢台人. 博士. 中国科学院上海天文台高级工程师, 2018年中国科学院青年创新促进会会员. 主要研究方向为卫星激光测距及应用.

E-mail: wdmeng@shao.ac.cn