

文章编号: 0258-7025(2008)12-2022-04

高精度事件计时器的设计与实现

李祝莲 熊耀恒

(中国科学院国家天文台云南天文台, 云南 昆明, 650011)

摘要 高频率、大范围和高精度是现代卫星/月球激光测距(SLR/LLR)的发展趋势,需要高精度事件计时器作为其时间测量单元。分析研究了事件计时器测量时间的原理,并基于时间数字转换(TDC)和现场可编程门阵列(FPGA)技术,用TDC芯片测量微小时间间隔,同时结合FPGA芯片设计和实现整个高精度事件计时器。进行了信号周期测量实验,结果表明,该测量仪准确度高,标准偏差值优于50 ps,系统误差小于11 ps,量程为24 h,温度漂移小于100 fs/°C,短期稳定性好于±3 ps/h。

关键词 光学器件;测量与计量;天文仪器;事件计时器;时间数字转换;现场可编程门阵列

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.2022

Realization and Design of High-Accuracy Event Timer

Li Zhulian Xiong Yaoheng

(Yunnan Astronomical Observatory of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract High ranging speed, wide measurement range, and high accuracy are the trends of modern satellite/lunar laser ranging (SLR/LLR). High precision event timer is demanded as the timing unit in such a laser ranging system. The time interval timing principle of event timer is analyzed. A high-accuracy event timer is realized and designed based on time-to-digital converter (TDC) and field programmable gate array (FPGA) technique, for which the TDC chip is used to measure fine time and the FPGA chip is used to measure coarse time and control the whole timing system. Signal period measurement experiment is performed, showing the standard deviation better than 50 ps, the systematic error less than 11 ps, the measurement range of 24 h, the temperature drift below 100 fs/°C, and temporal stability lower than ±3 ps/h.

Key words optical devices; measurement and metrology; astronomical instruments; event timer; time-to-digital converter; field programmable gate array

1 引言

卫星激光测距(SLR)是卫星精密定位观测的主要手段之一,其原理是通过测量激光脉冲从地面观测点到卫星的往返时间间隔来计算得到卫星离地面观测站的距离。时间测量精度越高,对目标的定位能力越强。通常,有两种时间间隔测量原理,即时间间隔计数原理和事件测时原理^[1]。传统的卫星激光测距系统中,采用时间间隔计数原理来测量激光脉冲飞行时间,只能对时间间隔逐个进行测量,即主

波开门,回波关门,完成一次测距。因此,测量频率受到卫星距离的限制^[2]。现代激光测距的特点除了高测量精度外,还有高测量频率(如千赫兹测距)和远测量距离(如激光测月)。在前一个激光发射脉冲的回波还未回到地面观测站前已有多个激光发射脉冲发射出去,所以常规的时间间隔测量仪器已不再适用,需要研制事件计时器。国际上已研制出皮秒级精度的事件计时器,而国内目前对事件计时器的研究较少。本文基于时间数字转换(TDC)和现场可编程门阵列(FPGA)技术,研究事件计时器的实

收稿日期:2008-03-26;收到修改稿日期:2008-04-25

基金项目:国家自然科学基金(10778705)资助项目。

作者简介:李祝莲(1978—),女,云南人,博士研究生,主要从事卫星/月球激光测距技术方面的研究。

E-mail: lzhl8002@163.com

导师简介:熊耀恒(1955—),男,云南人,研究员,博士生导师,目前主要从事天文仪器与方法、自适应光学和卫星/月球激光测距技术方面的研究。E-mail:xyh@ynao.ac.cn

现原理及其具体设计方法。

2 测量原理及设计实现

时间间隔测量有其本身的特殊性,即测量时间间隔所需的时间本身也是时间间隔^[3],所以测量速度受到卫星距离的限制。事件计时器的引入能很好地解决这个问题。其测量时间间隔的原理是把主波和回波都视为单个事件,精确记录每个事件发生的时刻,然后根据卫星或月球的预报轨道推算出激光脉冲往返时间间隔,利用计算机识别相关的主波和回波各自的时刻,两个时刻之差即为所测量的时间间隔值。

2.1 测量事件发生时刻的原理

测量事件发生时刻的原理如图 1 所示,其中 T_{epo} 为事件发生(用信号上升沿表示)的时刻,如果时钟的周期为 T ,则

$$T_{\text{epo}} = N \times T + \Delta t_1, \quad (1)$$

其中 N 为循环计数器中所记录的时钟周期数。

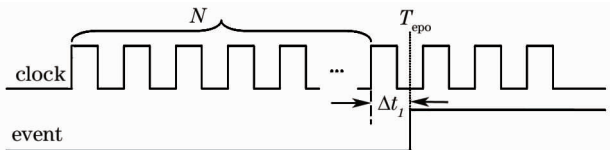


图 1 事件发生时刻测量

Fig. 1 Measurement of event happening epoch

传统数字法时间间隔测量的测时误差主要为开始和结束 2 个脉冲周期的计数误差^[4],最大总计数误差为 1 个脉冲周期。如果能减小脉冲周期和分别测出开始和结束 2 个脉冲周期中多计或少计的微小时间间隔,那么能大大提高时间间隔计数器的测量精度。同理,在此减小时钟周期 T 与精确测出微小时间间隔 Δt_1 可提高事件计时器的测量精度。

设计中,时钟信号通过对高精度、高稳定度时钟提供的 10 MHz 信号倍频后获得,微小时间间隔由 TDC 芯片来测量,采用德国 ACAM 公司研发的 TDC-GPX 芯片。

2.2 TDC-GPX 芯片测量微小时间间隔的原理

TDC-GPX 是一种多功能的高端时间数字转换器,利用简单逻辑门(如反相器)的传播延迟来精密量化时间间隔。由于在信号速度尤其是 CMOS 部分上的巨大成果,使利用标准 CMOS 技术的 TDC 测量皮秒精度范围成为可能。芯片 TDC-GPX 测量开始信号到结束信号之间的时间间隔的原理如图 2 所示^[5,6]。

开始信号每经过一个逻辑门被延迟 t_1 , 结束信

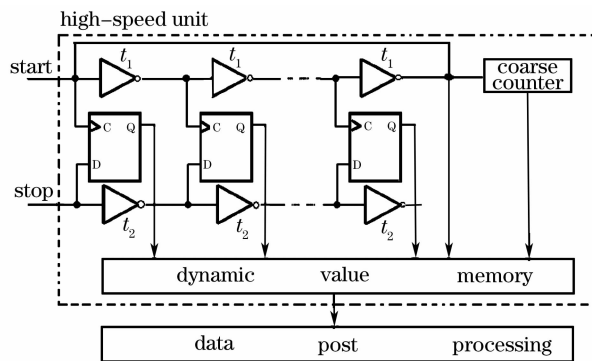


图 2 微小时间间隔测量原理框图

号每经过一个逻辑门被延迟 t_2 , t_1 略大于 t_2 , 二者越接近,测量分辨率越高。在结束信号追上开始信号处,对应的比较器(D 触发器)输出为逻辑 1,如果共经过了 n 次延迟,由(2)式可计算开始信号和结束信号之间的时间间隔 Δt_2

$$\Delta t_2 = N_1 \times T_{\text{start}} + n \times (t_1 - t_2), \quad (2)$$

其中, T_{start} 为开始信号的周期; N_1 为粗计数器的计数值。芯片中使用粗计数器是为了增大其量程, TDC-GPX 器件的量程因工作模式不同而不同,选择的工作模式中其量程为 $0 \sim 10 \mu\text{s}$ 。开始信号和结束信号之间的时间间隔由非门的个数来决定,而非门的延迟时间可由集成电路工艺精确确定。每完成一次测量,开始信号和结束信号之间的时间间隔由 TDC-GPX 芯片计算后输出至芯片中的前进先出(FIFO)寄存器中供用户使用。

TDC-GPX 芯片中设有精度可调模式,在该模式下可使用锁相环(PLL)调整 TDC-GPX 芯片的核心电压^[7],使得测时分辨率,即 $t_1 - t_2$ 的值,可以通过写 TDC 芯片中的寄存器来设置为需要值,设计的事件计时器中设置为 4 ps。而且经过锁相环调整, TDC-GPX 芯片具有极高的温度稳定性。

2.3 系统设计与实现

系统设计基本框图如图 3 所示。精细时间测量和粗时间测量共同组成一次完整的事件发生时刻测量,因此,不仅时间间隔测量范围宽,而且测量精度高。由 TDC-GPX 芯片测量精细时间,同步脉冲计数器测量粗时间。每到达一个事件进行一次测量,测得的精细时间和粗时间被送到控制器中进行数据处理,然后给出事件发生的时刻。

基于 FPGA 体积小、集成度高、速度快、可靠性强、容量大(可在其上实现片上系统)以及内嵌 NIOS 处理器等特征,图 3 中虚线框内的所有单元都使用 ALTERA 公司开发的 FPGA 器件实现。

PLL 单元是器件中内嵌的时钟锁相环,用它将高精度高稳定度的外部 10 MHz 频率参考输入时钟信号倍频到 100 MHz 的时钟信号,作为 TDC-GPX 芯片的开始信号和计数器单元 10 ns 分辨率的计数时钟。计数器单元为二进制同步脉冲计数器,实现 24 h 循环计数,使得事件计时器的量程达到 24 h。控制器单元设计在 NIOS 处理器中,实现从 TDC-GPX 芯片的 FIFO 寄存器和计数器读数据进行处理然后输出事件发生时刻或时间间隔的功能。

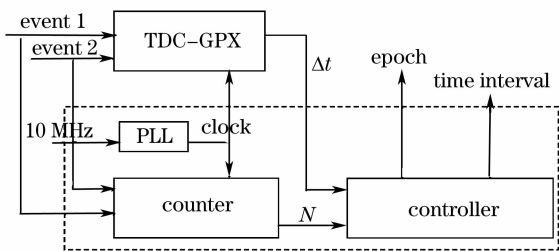


图3 事件计时器实现框图

Fig. 3 Event timer design block scheme

因事件计时器的高频特性,设计中选用 STRATIX II 的 EP2S30F484C3 器件。90 nm 高性能和大容量 STRATIX II 代 ALTERA FPGA 器件支持高达 500 MHz 的内部时钟频率,一般的设计性能超过 250 MHz。EP2S30F484C3 器件,包含 484 个引脚,6 个 PLL 和 1.37×10^6 bits 的 RAM 空间,速度最大可达到约 500 MHz,工作温度为 $0 \sim 85$ °C^[8]。FPGA 器件内的整个设计在 ALTERA 公司强大的 SOPC Builder 系统开发工具,Quartus II 设计软件和 Nios II IDE 集成开发环境中完成。利用 SOPC Builder 和 Quartus II 可以在几分钟内设计一个系统,再通过使用 Nios II IDE 加速软件的开发过程。

设计中,使用 SOPC Builder 系统开发工具生成的单元包括,Nios II 处理器(即软 CPU 核),片上随机存储器(OCM),Avalon 三态桥,用户自定义接口(IUL),RS-232 串口(UART)以及定时器等 IP 核。系统的工作时序为,同步脉冲计数器对 100 MHz 时钟进行循环计数,100 MHz 时钟信号被送到 TDC-GPX 芯片的开始输入端,一旦有事件到达立即锁存计数器的计数值,同时该事件信号被送至 TDC-GPX 的结束输入端,然后 TDC-GPX 芯片将测出事件信号与距该信号最近的上一个 100 MHz 时钟信号脉冲上升沿之间的时间间隔。控制器采集到这两个测量时间数据后,按式(1)计算出事件发生的时刻,然后通过 RS-232 串口送到用户使用端。至此,

完成一次事件发生时刻测量。

3 测试实验

在频率参考输入为高精度高稳定度铯原子钟提供的 10 MHz 信号下,测量周期为固定值的信号周期。具体方法为,通过测量信号上升沿时刻后再将两个相邻的测量数据相减获得信号的周期,而在设计的事件计时器中已设计了将前后两个测量时刻值作差后直接输出时间间隔的功能(此设计仅为方便该测量仪与当前的传统卫星激光测距方式接口)。测量数据通过串口送数据采集计算机,串口传输速度为 1.15×10^5 bits/s。通过实验发现前后两个被测事件之间的时间间隔小于 $1 \mu\text{s}$ 时,测量结果不确定。由此表明该测量仪器的测时盲区为 $1 \mu\text{s}$,即最高测量频率为 1 MHz,可满足千赫兹的高重复频率测距。测时盲区越小,事件计时器的测量频率越高,而减小测时盲区的关键是减少软硬件系统延迟。

在实验中,测量信号的周期为 $89 \mu\text{s}$ 。考虑到时钟信号的漂移,对测量数据进行处理时,每 200 个测量数据按照大于 2.6 倍标准偏差剔除迭代后计算平均值和标准偏差,计算公式为

$$\bar{\chi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{200} x_i, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (4)$$

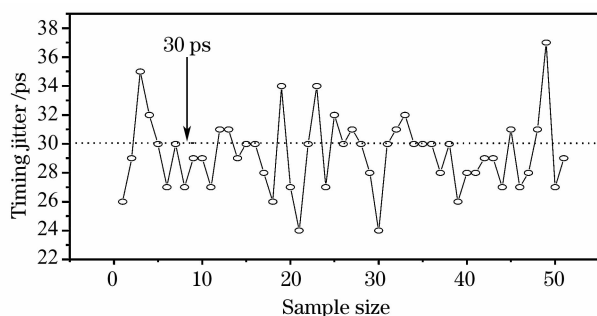


图4 标准偏差

Fig. 4 Standard deviation

标准偏差数据如图 4 所示。从中可以看出,标准偏差值在 24~36 ps 之内且主要分布于 26~32 ps 之间。

用求得的每个平均值减去被测量周期 $89 \mu\text{s}$,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,平均值对被测量值的固定偏差小于 11 ps,且用所有 10^4 个测量数据的平均值减 $89 \mu\text{s}$ 的结果约为 4.08 ps,表明该测量仪器的系统误差较小。

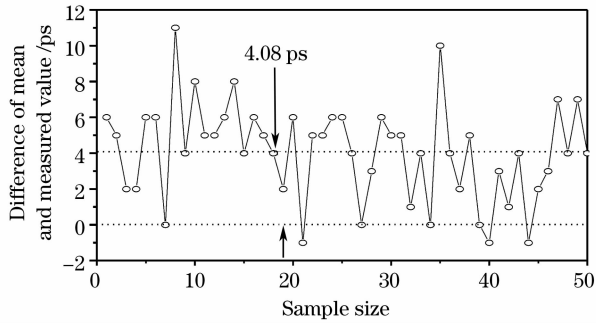


图 5 固定偏差

Fig. 5 Drift of average value

标准偏差受温度的影响情况如图 6 所示, 开机后立即开始测量 $89 \mu\text{s}$ 信号的周期, 并分别在开机后 1, 2, 6.5 和 7.5 h 及其前后采集 1000 个数据点。7.5 h 内使测量仪器温度上升大约 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ (开机时的温度为 $21 \text{ }^\circ\text{C}$)。由图 6 可以看出, 平均值的波动在 10 ps 之内, 主要落在 6 ps 的范围, 温度漂移小于 $100 \text{ fs}/^\circ\text{C}$ 。

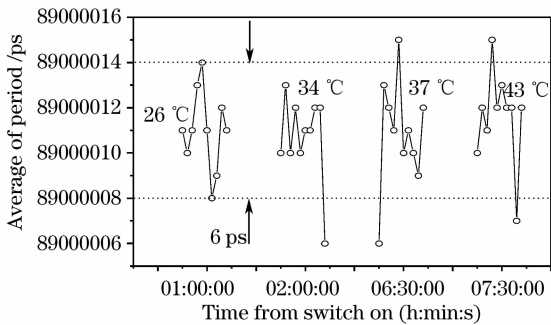


图 6 测量平均值随温度的变化

Fig. 6 Temperature drift

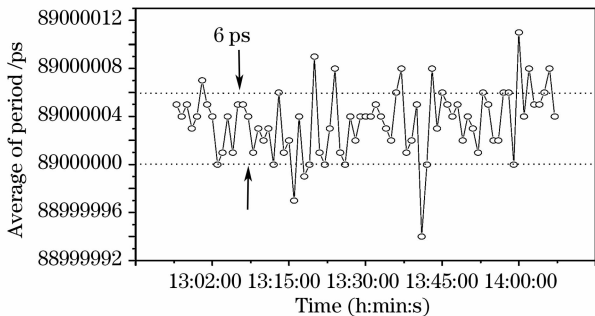


图 7 测量平均值随时间的变化

Fig. 7 Temporal stability

开机便开始测量 $89 \mu\text{s}$ 信号的周期, 一段时间后, 在任意 1 h 内采集测量数据, 从下午 13:00 到 14:00 每 15 min 采集一些数据, 其平均值如图 7 所示。从图 7 可以看出, 平均值波动在 10 ps 之内, 主

要在 6 ps 的范围, 表明该测量仪器的短期稳定性较好, 小于 $\pm 3 \text{ ps/h}$ 。

4 结 论

时间间隔的测量主要有三种方法: 模拟法、数字法和数字插入法^[9], TDC-GPX 芯片采用延迟线数字插入法, 在 FPGA 芯片中可实现数字法测量粗时间间隔。根据千赫兹测距系统和月球激光测距系统的要求, 采用 TDC-GPX 芯片测量精细时间间隔, 结合 FPGA 芯片设计了高精度的事件计时器。该测量仪器的时间分辨率为 4 ps, 测时盲区为 $1 \mu\text{s}$, 标准偏差值优于 50 ps, 系统误差小于 11 ps, 可以测量的时间范围是 24 h, 温度漂移小于 $100 \text{ fs}/^\circ\text{C}$, 短期稳定性好于 $\pm 3 \text{ ps/h}$ 。性能满足千赫兹测距和月球激光测距, 也同样适用于传统的卫星激光测距中, 测量精度可达到亚厘米量级。

参 考 文 献

- 1 Karel Hamal, Ivan Prochazka, Josef Blazej. Contribution of the pico event timer to satellite laser station performance improvement [C]. *SPIE*, 2000, **3865**:38~42
- 2 Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics[M]. Shandong: Shandong Science and Technology Publishing House, 2000. 91~118.
叶叔华, 黄 斌. 天体地球动力学[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2000. 91~118
- 3 Zhang Yan, Huang Peicheng. High-precision time-interval measurement techniques and methods [J]. *Progress in Astronomy*, 2006, **24**(1): 1~15
张 延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. *天文学进展*, 2006, **24**(1): 1~15.
- 4 Huang Zhen, Liu Bin. New method to measure the time-of-flight in pulse laser ranging [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(9): 1153~1155
黄 震, 刘 彬. 脉冲激光测距中时间间隔测量的新方法[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(9): 1153~1155
- 5 <http://www.acam.de/index.php?id=25&L=0>
- 6 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1422~1426
雷琳君, 杨 燕, 陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1422~1426.
- 7 http://www.acam.de/fileadmin/Download/pdf/English/DB_GPX_e.pdf
- 8 <http://www.altera.com.cn/literature/lit-stx2.jsp>
- 9 Huo Yujing, Chen Qiansong, Pan Zhiwen. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3): 136~139
霍玉晶, 陈千颂, 潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(3): 136~139