

高精度事件计时器及其在卫星激光测距应用

秦 思¹, 吴志波^{1,2}, 张海峰^{1,2}, 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)

摘 要:高重复率卫星激光测距需采用事件计时方式记录激光发射和接收时刻,作为测距系统精密计时单元。本文介绍了事件计时器测量原理,以及上海天文台基于时间数字转换(TDC)和现场可编程门阵列(FPGA)所设计开发的高精度事件计时器。对该事件计时器性能进行了测试,计时精度优于10 ps,非线性误差在数皮秒内。利用上海天文台卫星激光测距系统,进行了事件计时器控制软件开发,对地面靶目标和卫星进行了观测。根据国际激光测距数据处理中心反馈,卫星测量误差达到国外同类事件计时器水平,满足卫星激光测距应用要求。

关键词:卫星激光测距;精密计时;事件计时器;卫星观测

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.005

High precise event timer and its application to satellite laser ranging

QIN Si¹, WU Zhi-bo^{1,2}, ZHANG Hai-feng^{1,2}, 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 Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: High repetition rate satellite laser ranging needs to record the laser transmitting and receiving epoch by using the event timing method, which is regarded as the precise timing unit of the ranging system. This paper introduces the principle of event timer, and the high precise event timer designed and developed on the basis of Time Digital Conversion (TDC) and Field Programmable Gate Array (FPGA) in Shanghai Observatory. The performance of the event timer was tested, with the timing accuracy of better than 10 ps, and the nonlinear error of a few picoseconds. Using the shanghai satellite laser ranging system, the event timer control software was developed to measure the ground targets and satellites. According to the feedback from the international laser ranging data processing center, the error of range measurements reaches the accepted level which is similar with the well-known A033-Event Timer developed by Latvia, and meets the application requirements of satellite laser ranging.

Key words: satellite laser ranging; precise timing; event timer; satellite observation

1 引 言

高精度的时间间隔测量技术在空间探测、卫星弹道、雷达定位、激光测距、大型通信系统、电力系统、物理科学试验等领域中有十分广泛的应用。随着电子科学技术的发展,特别是集成电路 VLSI

(Very Large Scale Integrated) 的出现,使得时间间隔测量技术得到很大程度的发展,形成了大量成熟的高精度测量技术及设备,测量精度已达皮秒或亚皮秒^[1]。其中事件计时(Event Timing)就是一种重要的测量技术,其测量设备称为事件计时器(Event

基金项目:国家自然科学基金项目(No. U1631240, No. 11503068);博士后创新人才计划项目(No. BX201700270);博士后第62批面上基金项目(No. 2017M621562)资助。

作者简介:秦 思(1982-),女,硕士,工程师,从事卫星激光测距应用研究。E-mail: qinsi@shao.ac.cn

收稿日期:2018-08-15; **修订日期:**2018-09-21

Timer),它是将前后相邻两个输入信号视为两个不同的事件,通过精确记录每个事件的发生时刻,由外部相应的数据处理软件读取所记录的时刻值,之后再行二次处理来获得两输入信号的时间间隔。

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)是 20 世纪 60 年代发展起来的一种高精度空间测量技术,其测量精度已达到亚厘米级。SLR 基本原理是由激光器按照一定的频率发射激光脉冲信号,通过测量激光脉冲信号从地面测距站到带有激光反射器的人造卫星的往返飞行时间,进而获得卫星到地面测距站的距离^[2]。简单的来说,卫星激光测距实际上就是一种时间间隔的测量,其时间间隔的精确测定直接关系着卫星距离值的测量,是卫星激光测距中的一项关键技术。随着激光测距技术的发展,激光信号的发射频率被提高到千赫兹量级^[3],传统时间间隔计数器因受其工作方式和测量精度的限制,已不能满足高精度、高重复率激光测距的要求,事件计时测量方式可满足其测量要求,而且事件计时器的测量精度已达到皮秒量级、测量速率高达 10 kHz,测时分辨率达 1 ps,已成为高重复率激光测距技术中必需的测量方式。

上海天文台于 2009 年建立了千赫兹卫星激光测距系统,引进了拉脱维亚电子及计算机科学研究所研发的 A032 事件计时器^[4],后来升级为计时精度优于 5 ps 的 A033 事件计时器。该事件计时器具有精度高,稳定性好等特点,被国内外激光测距站广泛使用。为适应国内 SLR 系统发展与应用要求,根据事件计时器测量原理及其实现方法,上海天文台基于时间数字转换(Time to Digital Converter, TDC)和现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)方法设计研发了高精度事件计时器^[5]。本文介绍了该事件计时器实现原理,分析了其计时测量精度,及非线性效应对时间间隔测量的影响,并结合在激光测距中的实际应用,研制的事件计时器性能达到了 A033 事件计时器的水平,能够满足卫星激光测距的要求。

2 事件计时器实现及性能测试

2.1 事件计时器原理及实现

事件计时器通过精确记录激光的主波和回波时刻,再根据卫星预报轨道所推算出的激光脉冲往返时间间隔,利用计算机识别出相关的主波与回波各自的时刻,其时刻差即为所测量卫星与地面站之间

距离。

为实现对输入信号长时间的精确计时,事件计时器一般采用插值法完成计时,即将事件时刻分为大数部分和精细部分,大数部分利用普通数字计数器完成,而精细部分则利用高精度时间间隔测量器件或技术获取。精细部分常采用插值法实现。

插值法原理如图 1 所示,其中 T 为事件发生(用信号上升沿表示)的时刻; t 为由事件脉冲到标准时钟相邻上升沿的间隔;如果时钟的周期为 T_p ,则:

$$T = nT_p + t$$

其中, n 为循环计数器中所记录的时钟周期数^[5]。

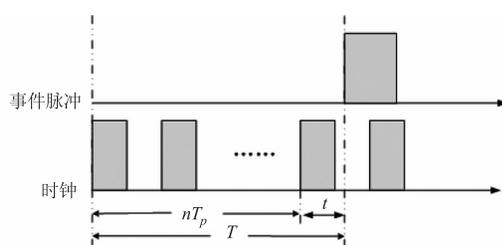


图 1 插值法事件计时原理

Fig. 1 The principle of event timing by interpolation

图 1 中,由时间起点到相邻于事件脉冲的标准时钟上升沿的基准时钟间隔 nT_p 称为粗时刻,直接由计数器测量得到。而由事件脉冲到标准时钟相邻上升沿的间隔 t ,称为精细时间间隔,则由 TDC 芯片负责测量。根据采用的测量方法,精度可从数皮秒到几十皮秒^[1]。

卫星激光测距除对事件计时器提出皮秒量级的高精度测量需求,考虑到测量间隔从近地靶的数十纳秒到高轨卫星的数百毫秒,还对非线性误差和测量频率(测量死区)提出了较高要求。

上海天文台采用性能优越的 TDC 器件及 FPGA,以外部 GPS 接收机的 1 pps 秒信号(同步)和 10 MHz 频率信号为时钟基准,完成了对事件时刻粗时间测量和精细时间测量的整合,实现可对输入脉冲时刻高精度记录的事件计时器。

事件计时器的设计框图如图 2 所示,主要包括精细时间测量单元和 FPGA 外围电路。精细时间测量单元用于小数部分时间的精确记录;FPGA 中的粗计时模块使用 200 MHz 倍频晶体,并与外部 10 MHz 信号同步,记录事件时刻的整数部分。两者相互结合,并由 FPGA 对最终的发生时刻进行整合,之后存入 FIFO,通过外部接口发

送给 PC 机。

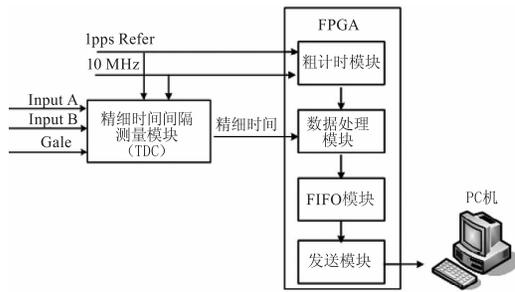


图 2 事件计时器设计框图

Fig. 2 Block diagram of the event timer

事件计时器使用时,首先采集 1 pps 信号的时
刻,与外部 GPS 时钟的秒时刻比较,获得事件计
时器内部时钟与 UTC 时间的差值,并将该差值应用于
所输入事件时刻值的改正,完成对输入脉冲时刻的
精确记录。根据上述方法设计研制的事件计时器实
物如图 3 所示。其中 INPUT A、INPUT B 为外部输
入脉冲信号,在测距系统中分别是主波和回波脉冲。
GATE 为门信号,INPUT 1PPS 为外部时钟输入秒
信号。

2.2 高精度事件计时器性能测试

在相同的实验条件下对本文研制的事件计时
器与拉脱维亚研制的 A033 事件计时器在计时精
度和非线性误差等方面^[6-7]进行了测试比较。实
验信号采用延时信号发生器 DG645 产生,A033 与
本文研制的事件计时器均外接 10 MHz 时钟频率
标准,1 pps 秒信号。两通道输出 NIM 信号,分别
对不同的时间间隔(80 ns、180 ns、1 μs、1 ms、
100 ms)进行测量。本文研制的事件计时器精度
测量结果如图 4 所示。A033 与本文事件计时器
的性能比较如表 1 所示。

从测量结果可以看出,本文研制的事件计时
器的时间间隔测量精度 10 ps 左右,非线性误差与
A033 计时器误差为数皮秒,可用于卫星激光
测距。



图 3 上海天文台研制的事件计时器

Fig. 3 Event timer developed by Shanghai Observatory

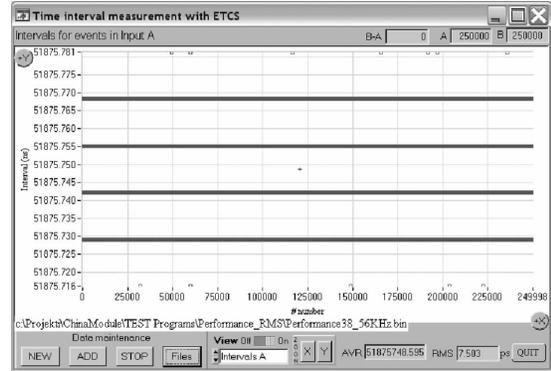


图 4 本文研制的事件计时器测量精度测试结果

Fig. 4 RMS of event timer developed in this paper

表 1 A033 与本文研制的事件计时器性能比较
Tab. 1 Comparison of the performance of the A033
and the event timer developed in this paper

延时器 设定值 /ns	A033		本文计时器		测量值 之差/ns
	测量值 /ns	精度 /ps	测量值 /ns	精度 /ps	
80	79.519	8	79.835	10	0.316
180	179.413	7	179.725	8	0.312
1080	1079.258	8	1079.577	8	0.319
1000080	1000079.147	8	1000079.464	10.3	0.317
10000080	10000079.225	17	10000079.544	12	0.319

3 高精度事件计时器在卫星激光测距中的应用

3.1 高精度事件计时器控制

为了将本文研制的事件计时器应用于卫星激光
测距,还需开发计时器相应的配套软件进行控制,以
获得卫星距离。

在测量之前需对事件计时器设备进行初始化,
包括并口初始化、计时器时间同步及时间同步检测
等操作,完后进行事件时刻数据记录和采集,如图 5
所示。

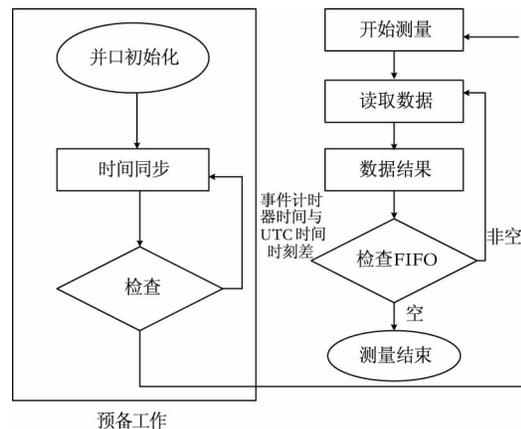


图 5 上海天文台研制的事件计时器操作控制流程

Fig. 5 The operation control process of the event timer
developed by Shanghai Observatory

1) 计时器并口初始化

计算机并口一般默认的模式为 SPP, 初始化后 SPP/ECP 模式将跳转为 EPP 模式, 并使读写使能。此后就可以进行并口 EPP 的操作。

2) 计时器时间同步

此过程类似于计时器设备外部同步信号计时模块。主要用于获得事件计时器内部时钟与 UTC 时钟的时间差, 以便将测量的事件时刻转换为 UTC 时间。同步时事件计时器在 1 s 之内读取秒信号, 同时计算出事件计时器的时钟与标准时钟 (如 GPS 或本地钟) 的差值, 该差值供后续计时器测量时刻值同步到标准时钟时间。例如在检测到事件计时器的秒信号时刻为 58.123456789123 s, 而此时标准时钟的时刻为 1000 s, 则事件计时器的后续测量的脉冲时刻结果均需加上 1000 - 58.123456789123 s, 方能获取与标准时钟同步的绝对时刻值。

3) 计时器时间同步检查

此过程检测事件计时器的时钟是否与标准时钟同步, 同时记录下事件计时器与标准时钟的时刻差, 待测量数据时用于修正读取的时刻。时间同步后, 事件计时器进入准备测量状态。

4) 计时器实时测量

事件计时器将记录的时刻数据分为两部分: 5 ns 为单位的整数部分与 5 ns 以下小数部分, 整数部分从粗计数器读出, 小数部分由 TDC 精细测量单元读出。

每个测量结果的信息由 8 个字节表示, 由 EPP 分 8 次读入。通过对这八个字节的逻辑操作, 就可以获取粗计数数值、精细时间 (小数部分)、A/B 通道等信息。

该事件计时器内部粗计数器为 34 位, 基准频率 200 MHz, 最长记录时间约为 42 s, 为了保持数据的连续性, 测量过程中需对每个通道的数据时刻不断的进行过零检查, 检测粗计数器是否过零点, 这可以通过检查同一通道相邻两个事件的测量结果大小来判断。过零则需要后续测量结果上补上一个粗计数器的周期时间。

5) 计时器测量数据处理

事件计时器将每个事件的精确时刻都记录下来。在激光测距中, 事件计时器记录的是激光脉冲的发出时刻 (即主波时刻) 和激光脉冲返回的时刻

(即回波时刻)。为了将主波和回波时刻对应起来, 事件计时器数据采集软件采用主回波时刻匹配算法。图 6 为主回波时刻匹配算法动态示意图。该算法定义两个数组, 一个用于存放主波时刻, 另一个用于存放回波时刻, 事件计时器测量到的事件时刻按先后顺序存入对应的数组。每次取回波数组中第一个回波时刻去和所有的主波时刻找对应, 一旦匹配上, 即主波回波之间的间隔与卫星距离的预报值之差小于一个限定值 (该限定值与预报精度有关, 理论上只要小于激光发射周期即可), 则标志位有效, 退出查找, 否则标志位无效。如果标志位有效, 则将两脉冲对应的时刻值相减, 计算出两脉冲信号的精确时间间隔数据, 即激光飞行时间, 用于测量数据的后续分析和应用。

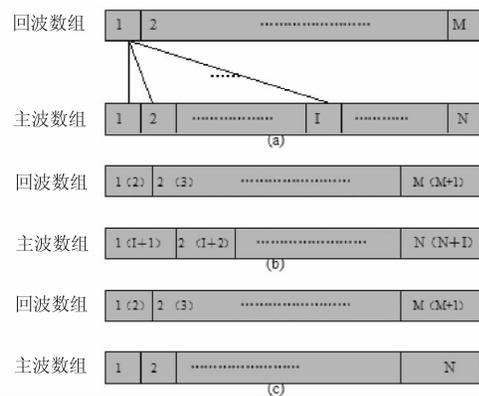


图 6 主回波时刻匹配算法动态示意图

Fig. 6 Dynamic sketch of matching the emitting epochs and the receiving epochs

为了能够及时读取每个事件的测量结果以提高系统实时性, 测量软件实时判断计时器 FIFO 状态, 一旦标记为存有数据, 则立即读取事件时刻数据, 并进行数据时刻匹配处理, 直至测量任务结束。

3.2 高精度事件计时器实验结果

用上述研制的事件计时器及开发的测量软件在上海天文台佘山千赫兹卫星激光测距系统中进行实际测量, 以验证事件计时器的性能。实时测距界面如图 7 所示。

本文研制的事件计时器与 A033 事件计时器的地靶及测距精度进行比较, 测量结果如表 2 所示。通过将观测卫星测量数据上传至国际激光数据处理中心进行处理, 以验证事件计时器测量的卫星距离的准确性。上海天文台研发的事件计时器对卫星激光测距的数据处理结果如图 8 所示。

