

事件计时器在卫星激光测距中的应用*

吴志波¹ 张忠萍¹ 陈菊平¹ 杨福民¹ 秦思^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

提 要

传统时间间隔的测量速率受限于被测事件的时间间隔,事件计时概念的引入可以很好地提高测量速率。事件计时器是高重频(kHz级)卫星激光测距(SLR)技术的主要设备。该文介绍了事件计时器A032-ET的性能以及其在卫星激光测距中的应用,为我国开展高重频SLR研究提供了技术支持。

主题词: 卫星激光测距(SLR) — 事件计时器 — 测量速率 — 高重频

分类号: TH714, P228.5

1 引 言

现代测量技术中,事件计时是一个非常重要的概念,对测量采样速率也提出了很高的要求。常规时间间隔测量设备的测量速率受限于被测事件的时间间隔^[1],事件计时器可以突破该限制,达到较高的测量速率。

高重频SLR技术自1992年提出以来,由于其具有回波点数多、测距精度高、捕获卫星快等优点,发展相当迅速,已成为SLR技术的发展方向。事件计时器(Event Timer, ET)是高重频SLR的主要设备,它可精确记录激光的发射时刻(主波时刻)和返回时刻(回波时刻),这些时刻经相关处理后可换算成激光的往返时间,获得卫星的测距数据^[2]。

本文介绍的事件计时器A032-ET分辨率达到1ps,精度好于10ps。通过编写对该设备的控制程序,采用一种十分有效的主回波相关算法可以获得卫星的距离测量数据,在国内SLR的测距中首次得到了成功应用。这有助于提高对远地卫星的测距频率,为我国开展高重频SLR提供了坚实的技术支持。

事件计时器用于提高时间间隔的测量速率的原理可通过图1来说明。图1是激光测距时间间隔测量原理图。若激光发射的周期为 T_s (代表要测量的样本周期), T_r 为卫星距离(用测量到的发射主波与接收到回波之间的时间间隔表示)。当 $T_r < T_s$ 时,可以测量到所有的样本,如图1(a);当 $T_r > T_s$ 时,如果采用一般时间间隔测量,常会引起部分样本的丢失。 T_r 越大,样本丢失的数目也越多^[1],如图1(b)。

事件计时器把发射主波和接收回波都视为事件,在计时器内有一个精密时钟,可以精确记录下每个事件的时刻(或称历元, Epoch)。然后,根据卫星的预计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对应的时刻,其时刻差即为所测量的时间间隔值^[2],即对应于第 i 次主波发射有: $T_{\tau i} = T_{Ri} - T_{Ti}$ 。这样就解决了卫星的距离大于激光发射周期引起的样本丢失问题,从而可大大提高测量频率,以提高接收回波的点数。

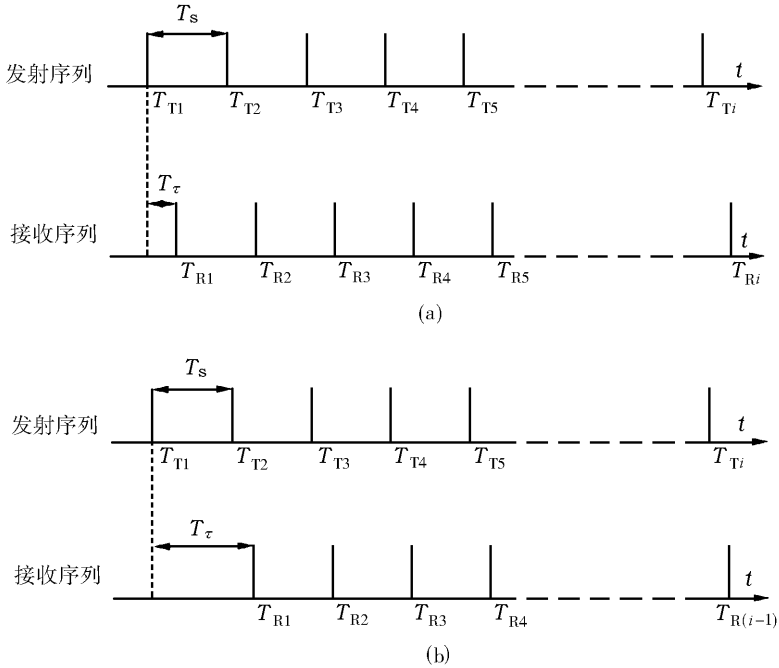


图 1 激光测距时间间隔测量示意图

(a) 低重复率 (b) 高重复率

Fig. 1 The sketch map of time-interval measurement in SLR

2 A032-ET 介绍

事件计时器最早由美国马里兰大学研发,并成功用于月球激光测距。经过几十年的发展,事件计时器已经商业化。法国 Dassault 事件计时器精度最高为 1ps,符合航天要求,但价格很贵^[3]。拉脱维亚的事件计时器性价比较高,其中 A032 系列性能最佳,最大测量频率达 10kHz,表 1 是 A032-ET 的主要性能指标。

表 1 A032-ET 的主要性能指标^[4]

Table 1 The specifications of A032-ET

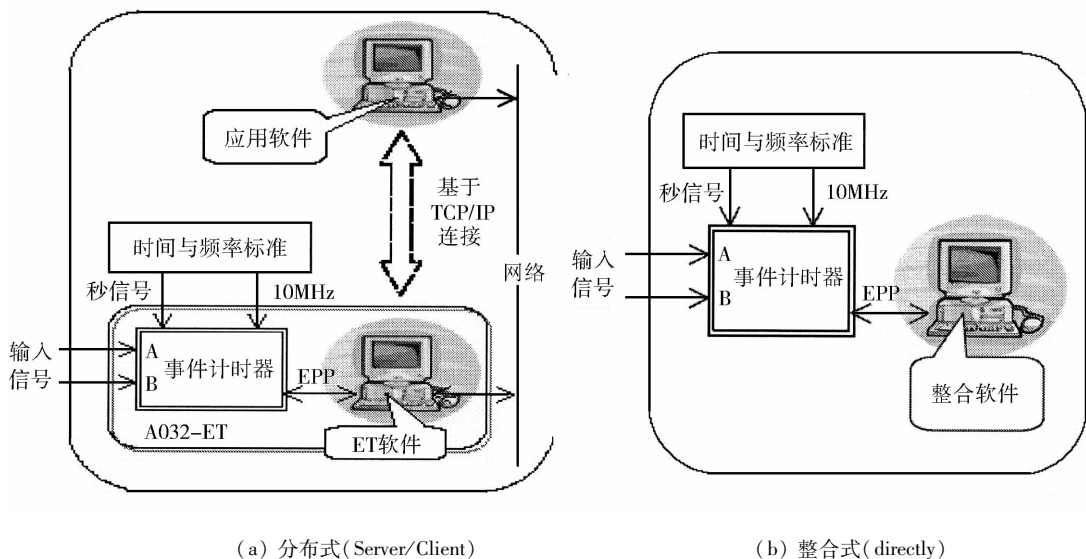
硬件接口	PC 机并口(EPP 模式)
精度	优于 10ps
测量速率(A032.1 option)	高达 10kHz
FIFO 深度	12000
测量死区	60ns
非线性误差	小于 1ps
输入通道 A、B	NIM 信号(下降沿,脉宽大于 5ns)
同步输入	TTL 信号(上升沿)
参考频率	10MHz(峰峰值大于 0.5V)

该事件计时器有两种工作方式 A032.1 和 A032.2,分别为高重频和低重频 SLR 所准备。其中 A032.1 工作方式为本研究的内容。该 ET 提供两个输入通道 A、B,Sync 通道为同步秒信号,REF 通道为外部参考 10MHz 信号。

为满足不同客户的需求,该设备提供了两种控制模式:分布式(Server/Client)和整合式(EPP 直接控制)。

在分布式控制模式下,服务端软件(ET software)由厂家提供,其通过 EPP 和事件计时器交互,负责解释来自客户端的命令、接收事件计时器的数据并传输至客户端。客户仅需通过网络编程编写客户端应用程序,与服务端交互。该工作模式适用于远程控制的时间系统或者多用户的时间系统,典型的分布式控制模式时间系统构造如图 2(a)所示。

由于网络有不确定的网络延时,对于实时性要求不高的测距来说,该工作模式影响并不大。但对于 kHz 测距系统等实时性较高的系统将造成严重的后果,为此,ET 软件也提供了 EPP 直接控制的工作方式,即将 ET 测量软件与应用程序整合在一起。基于增强并行口(EPP)的数据采集系统与基于 SPP 和 RS232 接口的数据采集系统相比具有更高的数据传输速率,所以 A032-ET 的测量频率高达 10kHz,可满足高重频 SLR 的速度和实时性要求。事件计时器需要大量的读写操作,所以该工作模式的编程工作量较大,这也是下面要讨论的内容,整合式控制模式构建的时间系统如图 2(b)所示。



(a) 分布式(Server/Client)

(b) 整合式(directly)

图 2 由事件计时器构建的时间系统

Fig.2 The structure of timing system based on A032-ET

3 A032-ET 应用于上海站的卫星激光测距

3.1 事件计时器编程实现

3.1.1 EPP 编程操作

本文所使用的控制软件是基于 VB 语言,该语言没有底层操作函数,因此我们采用 VC 中内嵌汇编编写了一个 oex 控件供 VB 调用。outport 函数在 VC 中实现如下:

```

ti = unsigned short(m_portAdd);
tc = unsigned char(m_portDataOut);
__asm
{
    mov dx, ti
    mov al, tc
    out dx, al
}

```

EPP 接口定义了四种寄存器:控制寄存器、状态寄存器、数据寄存器、地址寄存器。它们的地址是在基地址上加一个偏移量,通过对这四种寄存器的操作可完成与事件计时器的所有交互工作^[5]。如:

```

Outport( addrM, 0x05)    // 允许写数据,    addrM = 基地址 + 2
Outport( addrA, 0x01)    // ET 复位模式,    addrA = 基地址 + 3
Inport( addrS)           // 读取端口状态,    addrS = 基地址 + 1
Inport( addrD)           // 读取端口数据,    addrD = 基地址 + 4

```

3.1.2 测量前准备工作

为获得精确记录事件历元时刻并获取设备的状态,该设备在使用测量之前需要进行校准、同步等一系列准备工作。

(1) 并口初始化:一般并口默认模式为 SPP,初始化后 SPP/ECP 模式将跳转为 EPP 模式(或者在 BIOS 下直接修改成 EPP 模式)并读写使能。此后方可进行 EPP 的编程操作。

(2) 校准:该工作可以使事件计时器在当前环境下获得最佳的测量精度。此过程使用内部产生的信号对当前环境下事件计时器的物理特征进行统计分析,建立一系列的统计参数。后续测量结果根据这些参数可修正测量结果 10ns 以下的精细部分。另外,此过程也检查外部 10MHz 时钟是否存在,否则将启动内部的 100MHz 时钟。最终给出该事件计时器的精度估计值。

(3) 时间同步:像大多数高精度时间与频率标准的要求一样,只要在 10s 之内有四个连续的稳定秒信号(即相邻秒信号间隔为 $1s \pm 100ns$)就认为具有稳定的同步信号。然后计算出 ET 的时钟系统与实时时钟系统(如 GPS)的钟差,该钟差供后续的测量结果与实时时钟同步。如我们检测到 ET 的秒信号时刻为 34.56789213s,而此时实时时钟的当前秒时刻为 10000s,则 ET 的后续测量结果均需加上 10000 - 34.56789213s 才能与实时时钟同步。

(4) 同步检测:检测 ET 的时钟是否与实时时钟同步。确认同步后,ET 就可以进入测量过程,否则重新进行时间同步的工作。

3.1.3 测量过程

A032-ET 的事件时刻分为两部分——以 10ns 为单位的整数部分与 10ns 以下的小数部分,整数部分从粗计数器(100MHz)读出,小数部分由精细测量单元读出。

A032-ET 每个测量结果的信息由 8 个字节表示,由 EPP 分八次读入。通过对这八个字节的逻辑操作,我们可以获取粗计数器值、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 39 位,这意味着该 ET 最长可记录 1.5 小时,因此测量过程中必须不断检测粗计数器是否过零点,这可以通过检查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。

另外,为了获取优于 10ps 的测量精度, A032-ET 对相邻事件间隔小于 $12\mu\text{s}$ 的事件给出了一系列非线性修正值,该值由厂家提供,测量中根据相邻事件的间隔找到对应的修正值。

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,在每个事件读取之后需要重新检测 FIFO 是否为空,否则需要继续读取直到 FIFO 为空。图 3 为事件计时器控制流程图。

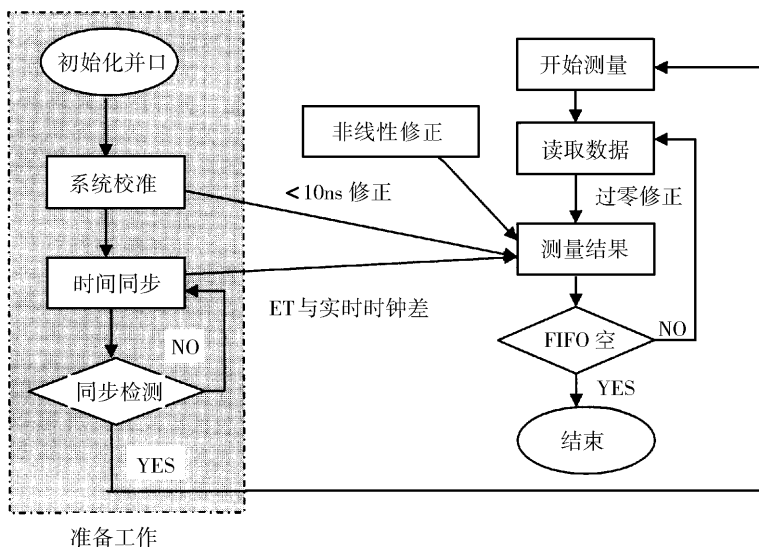


图 3 事件计时器控制流程图

Fig. 3 The flow chart of controlling the ET

3.2 主回波匹配算法

ET 的使用可确保每个事件的精确时刻都记录下来,而从这些事件时刻中提取卫星的距离则是本应用的第二个难点。根据卫星测距的实际情况,一种主回波时刻匹配的算法在上海台的卫星激光测距中获得了应用。

该算法定义两数组,一个用于存放主波时刻,另一个用于存放回波时刻,ET 测量到的事件时刻按先后顺序存入对应的数组。

每次我们取回波数组中第一个回波(最先到的)来和所有的主波找对应,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),标志位有效,退出查找,否则标志位无效。如果标志位有效,则可计算出激光飞行时间,主波和回波数组前移,以继续下一次匹配;标志位无效,则表明该回波没有匹配的主波,删除该回波。两数组也就匹配情况发生动态变化。

如果第一个回波和第 I 个主波匹配上了,那么标志位有效(见图 4(a)),卫星距离的测量值即回波第一位和主波第 I 位的时刻差,可以进行下一步处理。接下来数组就变成如图 4(b)所示。回波数组前移一位,主波数组前移 I 位。图 4(b,c)括号中的数字为数组前移前的序号。

如果没有找到匹配,标志位无效,返回等待下次对应。该种情况说明当前回波可能是噪声,没有主波与其匹配。所以回波数组前移一位,主波数组不动。最后数组如图 4(c)所示。

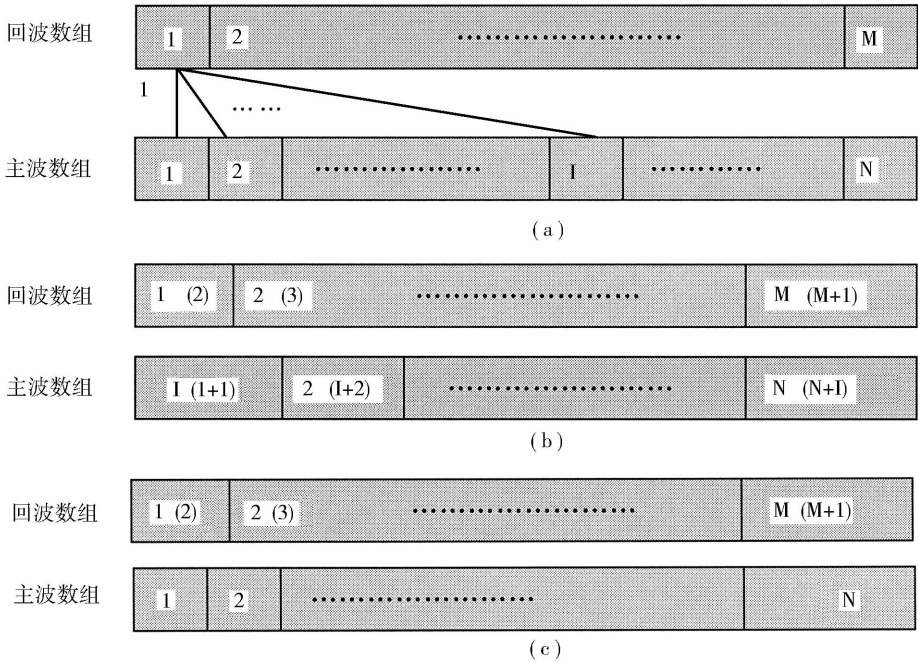


图 4 主回波匹配动态示意图

Fig. 4 The dynamic sketch map of matching the emitting epochs and the receiving epochs

4 测距结果分析与展望

自从 2006 年 3 月份以来,我们应用 A032-ET 已测量了不少圈卫星。部分测量结果如表 2 所示。

表 2 使用 A032-ET 测量卫星的部分结果

Table 2 The partial results of SLR based on A032-ET

卫星名	测量时间/UTC	测量精度/mm
AJ	2006/04/03 16:00	39.5
AJ	2006/03/29 16:56	24.4
ST	2007/03/11 17:27	22.4
LS	2007/03/20 14:08	29.6
AJ	2007/03/20 15:16	36.1
R2	2007/03/20 14:17	35.4
SL	2007/08/07 19:50	14.1
AJ	2007/08/08 12:43	29.1

常规激光测距中,AJISAI 卫星的精度处于 4cm ~ 5cm 之间,从上表中可知,使用 ET 后该卫星的精度获得一定程度的提高,这是因为 ET 的精度好于常规的 HP5370。该 ET 配合相应的

距离门控产生器、实时性较高的测距软件以及 10Hz 以上的激光器,有望对远地卫星实现频率超过 10Hz 的测距^[3],解决远地卫星长期只能使用较低频率测距致使获取的测距资料较少的问题,为远地卫星(如 GPS, GOLNASS 等)测距的进一步科学应用提供了有效帮助。另外,此 ET 的成功应用可为我国开展高重复 SLR 打下了坚实的技术基础,事件计时器的成功使用,也可为其他高精度时间应用领域提供一些启发。

参 考 文 献

- [1] 张延. 天文学进展, 2006, 24(1): 1
- [2] 叶叔华, 黄城. 天文地球动力学, 济南: 山东科学技术出版社, 2000
- [3] 吴志波. 高重复率卫星激光测距的研究(硕士论文), 上海: 中国科学院上海天文台, 2006
- [4] <http://www.edi.lv/HomePage/DataSheets/A032Manual.pdf>
- [5] http://www.edi.lv/HomePage/White%20paper/A032_sample%20program.pdf

THE APPLICATION OF EVENT TIMER IN SATELLITE LASER RANGING

WU Zhi-bo¹ ZHANG Zhong-ping¹ CHEN Ju-pin¹ YANG Fu-min¹ QIN Si^{1,2}

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

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The measuring rate of the traditional time-interval measurement methods is badly restricted by the time-interval and the event timing concept will resolve the problem perfectly. The event timer is a crucial equipment of high-repetition-rate SLR. This paper introduces the performance of A032-ET and how it is applied to SLR. The successful application will help to accomplish high-repetition-rate SLR.

Key words Satellite Laser Ranging (SLR) — event timer — measuring rate — high-repetition-rate