

# 星载计时器的研究与实现

范颖<sup>1,2</sup> 赵赟<sup>3</sup> 黄佩诚<sup>1</sup>

(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;

3. 中国人民解放军 61081 部队, 北京 100094)

## 提 要

星载计时器不但要求其适应空间环境(包括抗辐射性能、抗门锁、抗翻转性能、电真空性能和很宽的工作温度范围),同时要保证测量精度。该文在介绍时间测量的常见方法后,给出了星载计时器的原理;对计时器工作的空间环境进行了分析,并提出与其相应的适应空间工作环境的策略。

**主题词:** 星载计时器 — 抗辐射 — 抗热辐射 — 真空适应性

**分类号:** TH714

## 1 引 言

星载计时技术是基于星地之间高精度时间比对而提出的时间测量技术。星地激光时间比对具有精度高、系统误差小等优点,因此利用星地激光时间比对,不但可以对无线电时间比对系统进行外部精度检验,而且可以检验并分离无线电测量的系统误差,分析检测设备时延的不稳定性和卫星钟的中长期性能指标,提高卫星钟的预报精度。

星上激光时间比对设备由星载激光探测器、计时器和激光反射器组成。探测器接收地面发来的激光信号,计时器精确测量出此激光信号与卫星钟信号的时差,然后将此时差数据发回地面站;地面站根据此时差和激光信号相对地面钟的时差、激光信号经反射器往返卫星之间的路径时延,可以精确计算出星、地间的系统钟差,从而实现高精度星地时间比对。

作为星上激光时间比对设备的关键部件之一——星载计时器,一方面,要求其在空间环境下对时间信号提供精度和分辨率达到 100ps 的时间间隔测量;另一方面,又受到有效载荷比的限制;同时,由于星载计时器工作环境的特殊性,要求其有适应空间环境的工作能力,其中包括抗辐射性能、抗门锁、抗翻转性能、电真空性能和很宽的工作温度范围。

在地面上,高精度、高分辨率的时间间隔测量已经有比较成熟的技术。而对于有效载荷比的问题,随着集成电路的发展,不断有体积小,质量轻的芯片问世,因此,星载有效载荷比的限制并不难以满足。相对而言,适应空间工作环境要求以实现高精度时间比对是较为困难的。

## 2 星载计时器原理

### 2.1 时间间隔测量方法

常见的方法主要有:直接计数法,游标法,模拟扩展法和时延法。其中,直接计数法的原理为用极高频率信号在被测时间间隔期间进行直接计数,测出时间间隔,其分辨率和精度为纳秒量级<sup>[1]</sup>;游标法的原理类似于游标卡尺,采用两个独立的锁相振荡器,高精度地测出时间间隔,此方法分辨率和精度一般在 10 ~ 100ps 之间;模拟扩展法的原理为利用恒流源在被测时间间隔期间对电容器进行充电,利用 A/D(模/数)转换器测量此电压,由于恒流源对电容器充电在一定的范围内是线性的,因此测出电容上的电压值即可换算出时间间隔值,此方法分辨率和精度一般在 10 ~ 100ps 之间;时延法是利用集成电路内部时延来测量时间间隔的,目前有专门的芯片实现高精度时间测量,其测量分辨率和精度最高可达 10ps;也可利用 FPGA 内部的电路实现时延法测量,这就可以在航天等级的器件上实现高精度时间间隔测量,其测量分辨率最高可达 25ps。

### 2.2 计时器测时原理和数据传送

#### 2.2.1 测时原理

根据前面的分析,要求星载计时器结构简单、可靠性高和有效载荷比高,其测量分辨率为 100ps,采用电路时延法来实现高精度时间测量方法是最为合适的;为兼顾时间测量的量程和精度,采用插值法来实现大量程、高精度的时间测量;在时间间隔测量中,插值法指的是把一个时间间隔分为两部分:时间基准信号周期的整数倍部分与分数倍部分,即把时间间隔分为整数倍部分  $\Delta T$  和分数倍部分  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ ,整数倍部分则利用普通数字计数器进行测量(即图 1 中的 COUNTER),分数倍部分是由两个输入的被测信号与时间基准信号最接近的脉冲间的相位差

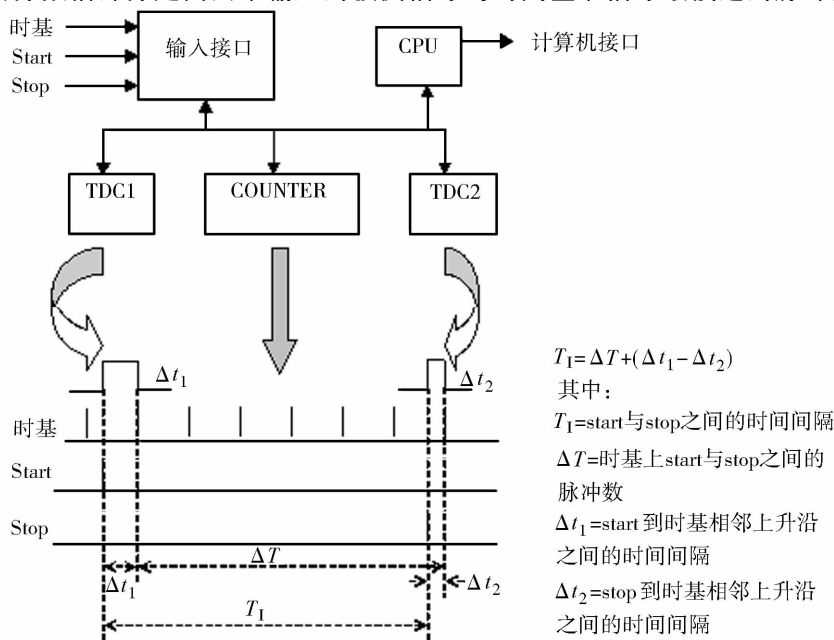


图 1 星载计时器原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of on-Board Timer

所对应的时间,分别由图 1 中的两个 TDC(Time Digital Converter)测量。从图 1 中可以看出,整数倍部分决定了计时器的量程,而分数倍部分决定了计时器的测时分辨率和精度,总的被测时延值为:  $T_1 = \Delta T + (\Delta t_1 - \Delta t_2)$ 。

### 2.2.2 数据传送

星载计时器的数据传送采用 MIL-STD-1553B 通讯接口。MIL-STD-1553B 总线被用来为各种系统之间的数据和信息的交换提供媒介,它类似“局域网或者 LAN”,以其优异的性能在航空、航天和航海电子设备上得到广泛的应用。此总线传输速度为每秒 1M 比特,字的长度为 20 比特,数据有效长度为 16 比特,信息量最大长度为 32 个字,传输方式为半双工方式,传输协议为命令/响应方式;故障容错有典型的双冗余方式,第二条总线处于热备份状态,此种工作方式使总线具有非常高的可靠性。计时器采用此种接口可以可靠地把测量数据传输到星上的数据系统并下传到地面。

## 3 星载计时器的空间工作环境分析

### 3.1 空间轨道

星载计时器工作的轨道有地球静止轨道 GEO(Geostationary Earth Orbit)、倾斜地球同步轨道 IGSO(Inclined Geostationary Orbit)、中高度圆轨道 MEO(Medium Earth Orbit)。其中,GEO 卫星可一天 24h 静止在规定的赤道位置上空提供本区域导航服务,卫星利用率高;IGSO 轨道中心位于赤道某设定的经度上,高度与地球静止轨道卫星相同,卫星星下点 24h 轨迹在本服务区内南北来回运动,是一种利用效率较高的区域星座,但只限于在本经度区域内使用;而 MEO 是经过 GPS 和 GLONASS 系统成功运行证明性能优良的全球星座轨道。

### 3.2 空间辐射环境

#### 3.2.1 辐射带

星载计时器搭载在 MEO 或 IGSO 轨道卫星上,所处空间的粒子辐射环境主要包括地球辐射带粒子辐射、太阳宇宙射线和银河宇宙射线。

##### (1) 地球辐射带粒子

在距地面高度 1500~1600(或 8000)km 以及 15000~20000(或 25000)km 处存在两个强辐射带,即范·艾伦带(Van Allen Belt),见图 2。范·艾伦带由高能电子和质子组成,是地球磁场从太阳风中俘获并禁锢而成的。这些高能粒子撞击卫星会产生 X-射线和附加的高能电子,对人造卫星电子设备损害极大,必须进行防护。

##### (2) 太阳宇宙射线

当太阳耀斑发生时,伴随有大量高能带电粒子的发射,这些高能粒子的能量一般为 10~1000MeV,能使星上大规模集成电路的计算机产生致命故障。

##### (3) 银河宇宙射线

来自银河系各个方向的高能带电粒子,绝大多数是质子和  $\alpha$  粒子,还有少量高能粒子,这就是银河宇宙射线。银河宇宙射线的能量大,但通量小。

#### 3.2.2 辐射效应的表现形式

文献[2]对空间中集成电路可能出现的故障进行了分析(见表 1),可以看出,计时器在空间环境中遇到的辐射效应主要表现为以下两种形式:

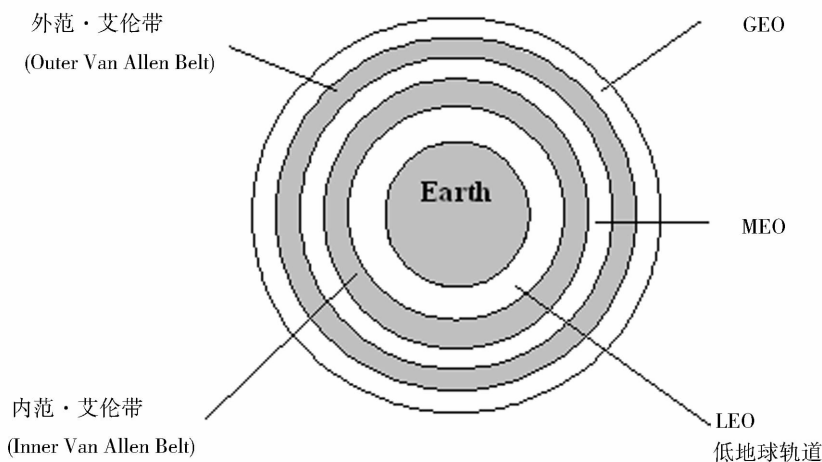


图 2 范·艾伦带

Fig. 2 Van Allen Belt

表 1 空间环境下造成集成电路永久或暂时故障的机制

Table 1 Temporary or Permanent Failure of Various Circuits in the Space Radiation Environment

器件, 电路, 组件	故障机制					暂时故障 单粒子翻转
	永久故障					
	老化	迁移率降低	电荷积累及 界面陷阱效应	单粒子锁定	永久性单 粒子效应	
硅二极管及 集成电路	P		S	P		P
MOS 管及 集成电路		S	P	P	P	P

注:P = Primary(主要的), S = Secondary(次要的)

(1) 总剂量效应 TDE(Total Dose Effect)

$\gamma$  光子或高能离子在集成电路的材料中电离产生电子 - 空穴对,电子空穴随即发生复合、扩散和漂移,最终在氧化层中形成氧化物陷阱电荷或者在氧化层与半导体材料的界面处形成界面陷阱电荷,使器件的性能降低甚至失效,这种现象称为电离总剂量效应。

(2) 单粒子事件 SEE(Single Event Effect)

空间辐射环境中的高能粒子会导致计时器中的器件发生单粒子事件。单粒子事件是由单个的高能质子或重粒子引起微电子器件状态改变,造成航天器异常或故障的事件。其中,影响最大的是单粒子翻转(SEU)和单粒子锁定(SEL)。

3.2.3 空间热辐射与真空环境

航天器在宇宙空间的温度变化是相当复杂的,除了内部仪器产生的内热以外,外部的附加热主要有三种:太阳热能,地球反射过来的太阳热能和地球自身的热能,其中前两项占总和的 90% 以上。

真空环境对于航天材料的选择有很大影响,首先是有些材料在真空环境下表面发生溅射

现象,因为任何材料在制造时都是在地面大气压的条件下形成固结表面的,表面大气压一旦不存在,表面的一些材料分子由于本身不断地运动,便会飞出来,形成表面材料溅射现象。

对于集成电路,由于在制造时都是在地面大气压的条件下进行封装,有些器件难免会有气体被封装在电路内部,形成气泡;一旦在真空环境下,特别是高温的真空环境下,一方面由于没有大气的压力而失去了压力平衡,另一方面由于高温使得内部气体膨胀,这就可能使集成电路发生爆裂从而损坏。

## 4 星载计时器适应空间环境的应对策略

### 4.1 抗空间辐射策略

星载计时器的抗辐射主要分为以下两个层次:

#### 4.1.1 采用航天级的抗辐射器件

由于辐射会给双极型器件带来电流放大系数下降和漏电流增加等影响;同时,双极型器件容量小,功耗大,无法大规模集成,所以在星载计时器中,主要采用 MOS 器件。而 CMOS 又是实现 FPGA(Field Programmable Gate Array,现场可编程门阵列)的主要微电子器件,因此对 MOS 器件的加固显得尤为重要。

对于 MOS 器件的加固,可以采取以下策略:

减少栅氧化层厚度;管壳上涂抗辐射涂层;采用真空封装;在电路输入输出端采取隔离措施以隔绝电压的振荡对电路造成的影响<sup>[3]</sup>;加入限流电阻,对于一些要求较高的场合,可以使用限流型低压降电压调整器(LDO)起限流作用<sup>[4,5]</sup>。

在工艺方面,可以选择抗辐照能力强的材料和制造工艺,如 CMOS/SOS, CMOS/SOI 等<sup>[6-8]</sup>。

#### 4.1.2 软件级别的加固

引入“看门狗”策略。当单粒子扰动引起程序“跑飞”时,“看门狗”能重启程序使系统恢复正常。有文献中提到采取五级看门狗的策略,即看门狗根据故障时间的长短启动五个逐级上升的保护机制,该方案的可行性很高<sup>[9]</sup>。

FPGA 在电路设计时采用冗余技术来实现对故障的监测和隔离,如三模冗余(TMR, triple modular redundancy)<sup>[10]</sup>;对于 SRAM(Static Random Access Memory,静态随机存取存储器)型的 FPGA,在系统板上增加了检查 FPGA 配置的逻辑电路,一旦检测到状态改变,就要重新加载。

### 4.2 抗空间热辐射策略

一方面,航天器外部可以使用隔热材料,另一方面,内部又有温度控制系统,可以使得舱内温度控制在一定范围内(如  $-10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ),在此温度范围内,计时器的正常工作虽然不成问题,而问题的关键在于在此温度变化环境下仍要实现高精度的时间测量。这个问题将在 4.4 节进行讨论。

### 4.3 适应真空环境策略

对于计时器来说,真空环境下集成电路可能会发生表面溅射和内部气泡爆裂现象而损坏集成电路,解决这个问题的方法主要有两种:一是利用特殊的检测方法(例如超声波探伤仪)检测集成电路的内部气泡进行元器件筛选;二是采用特殊夹具对集成电路进行加电热真空实验,进行元器件的筛选。采用特殊夹具是为了对集成电路实现无焊接加电筛选。

#### 4.4 空间环境的精度保证策略

在空间环境下,温度的变化和长期的辐射总剂量效应会使元器件的各种参数发生变化,在一般的逻辑电路中,如果它的影响使得逻辑电平的 0,1 界线变得非常模糊,才会对电路的功能产生影响,但这是一个非常漫长的过程,在可预期的寿命中,这种影响一般不会发生。但对于星载计时器精度达 100ps 的情况下,这种影响对于测量的精度要求则是致命的;我们要研制出可以在空间环境下可正常工作的、能够保证精度的计时器,就必须解决这个问题。

解决这个问题的最有效方法是实行实时校验策略,这个策略的基础是基于空间的温度、辐射总剂量效应等对计时器的影响,特别是在计时器的每个测量周期小于 1 秒的情况下是不会突变的。具体做法是在每个测量周期结束后,插入一个校验测量周期,并把校验测量的数据计入到本测量周期的实测数据上,就可有效地并且大部分地去除了空间环境对测量精度的影响。地面环境模拟实验已经证明这是非常有效的。

实时校验分两个层次进行,即高精度测量单元 TDC 的测量精度校验和整机两个通道的时间差校验;在星载计时器内,这两种校验测量直接占用的时间不到  $2\mu\text{s}$ ,因此这是一个高效率的校验策略,并且取得了很好的效果。

##### 4.4.1 高精度测量单元 TDC 的测量精度校验

对于高精度测量单元 TDC,由于采用了电路时延法测量,温度和辐射总剂量效应对其影响是巨大的!电路参数变化,特别是电路时延变化的影响,直接影响到测量的精度。采取的校验策略为:利用外部输入的标准频率信号的周期作为时标进行附加的校验测量,测出当前测量值与此时标测量值的数学关系,实现实时校验。

##### 4.4.2 整机两个通道的时间差校验

在时间间隔测量中,测量通道间的相对时延差的稳定性,对测量精度的影响也是巨大的。可以不必了解每个通道的绝对时延的大小与变化,但必须知道测量通道的相对时延差和它的稳定性。在空间环境下,我们可以在测量通道的设计方面,采取对称的原则,尽量实现两个通道信号所经过的路径一致。但这还不够,在空间环境下以及 ps 量级的测量中,这种一致性还不足以消除通道延迟差的变化对精度的影响。因此采取在每个测量周期结束后,实行对两个测量通道的延迟差变化进行实时校验测量,并把校验数据计入本次测量周期的测量数据内,以消除通道延迟差变化引起的精度误差。

## 5 结论和展望

本文回顾了时间间隔测量的一些基本方法,并根据星载计时器精度和分辨率要求提出了相应的设计方法,同时根据空间环境的要求,提出了能使计时器适应这些环境要求的设计原则和应对策略,我们根据这些原则和策略,设计和研制了精度和分辨率均达 100ps 的星载计时器,并成功地在试验卫星上在轨运行。同时希望这些方法和策略能对未来的更高精度的星载计时器的研制有一定的借鉴作用。

### 参 考 文 献

- [1] 张延,黄佩诚. 天文学进展, 2006, 24(1):1
- [2] Joseph R S. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(11): 1443
- [3] 王圣,苏金树. 计算机工程与应用, 2003, 28: 170

- [4] 张伟功, 蒋轩详等. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(4): 565
- [5] 杨雅, 廖瑛等. 上海航天, 2005, 6: 51
- [6] Tegze P H. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1978, SC-13(5): 669
- [7] 何玉娟, 师谦. 半导体技术, 2006, 31(5): 357
- [8] Liu S T, Jenkins W C, Hughes H L. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2442
- [9] 卢东昕, 滕丽娟等. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(1): 13
- [10] Agustin F L. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2003, 42 ~ 48

## RESEARCH AND IMPLEMENT OF ON-BOARD TIMER

FAN Ying<sup>1,2</sup> ZHAO Yun<sup>3</sup> HUANG Pei-cheng<sup>1</sup>

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

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

3. No. 61081 Unit of the PLA, Beijing 100094, China)

### Abstract

Given the ability to survive in space, including anti-radiation, anti-latchup, anti-upset, electro-vacuum and wide range of working temperature, on-board timer must also guarantee the measuring precision. After presenting common methods of time interval measurement, this article gives out the principle of on-board timer and then details the working environment in space, including space radiation, vacuum and thermal radiation. Corresponding strategy is listed at last.

**Key words** on-board timer — anti-radiation — anti-thermal radiation — vacuum adaptability