

# 空间光学遥感器控制系统的实时仿真测试

王 栋, 胡 君

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘 要:** 设计基于 Windows 系统的精确定时与多任务协调处理相结合的实时仿真测试系统。采用 FPGA 控制的 PCI 设备定时触发计算机外部中断的方法实现系统精确定时。按照由高到低的执行优先级, 重新排列指令的发出、解析、存储等任务的执行顺序, 避免出现定时中断无法响应的情况。实验结果证明, 系统定时精度可达 0.1 ms, 测试任务均能按时执行、及时解析并正确储存, 满足空间光学遥感器控制系统的实时仿真测试要求。

**关键词:** 空间光学遥感; 仿真测试; 精确定时; 多任务

## Real-time Simulation and Detection for Control System of Space Optics Remote Sensing Device

WANG Dong, HU Jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

**【Abstract】** A real-time simulation and detection system for control system of space optics remote sensing device is designed based on precise timing and multitask proportion method in Windows OS. Through external PCI device controlled by FPGA touching the computer external interrupt periodically, precise timing is realized. For work tasks order of transmitting, parse and saving is arranged newly by rule of PRI from high to low. Experimental results show that timing accuracy achieves 0.1 ms. All tasks can be executed punctually, parsed immediately and saved accurately, requirements of real-time simulation and detection are satisfied.

**【Key words】** space optics remote sensing; simulation and detection; precise timing; multitask

### 1 概述

空间光学遥感器是搭载于卫星上的有效载荷系统中的主要组成部分之一, 在卫星有效载荷控制系统的统一管理下进行工作, 根据卫星总体控制单元的具体任务指令和任务要求, 执行对地面特定目标的摄像、拍照以及记录等重要任务, 是卫星完成对地观测任务的核心单元。空间光学遥感器控制系统的功能、性能和协调性的好坏直接关系到设备的生存周期, 同时由于空间设备在执行任务中一旦遇到故障, 几乎是不可修复的, 因此在整个系统交付给卫星总体使用前, 对其控制系统的功能检测与性能验证是空间光学遥感器地面测试中的关键, 需要进行长期的运行监控与大量的仿真测试, 模拟控制过程中可能出现的各种情况, 确保任务执行万无一失。

在采用 Windows 操作系统的计算机平台开发的仿真设备中, 一个关键的技术难题就是如何解决设备的实时性操作问题, 其中最常遇到的是精确定时的实现问题<sup>[1-2]</sup>, 它直接关系到 Windows 仿真平台的适用范围。Windows 虽然是多任务系统, 但其不是并行执行多任务, 在微观上是串行操作的, 因此, 能否合理地分配时间单元, 协调地执行各项任务, 达到宏观上并行的效果, 也是系统设计好坏的主要评判标准。

### 2 仿真检测原理与系统组成

#### 2.1 卫星有效载荷控制系统原理

有效载荷控制系统是卫星上最重要的工作单元之一, 完成对有效载荷处理单元(PDHU)的监测与控制任务<sup>[3]</sup>。有效载荷控制原理框图如图 1 所示。

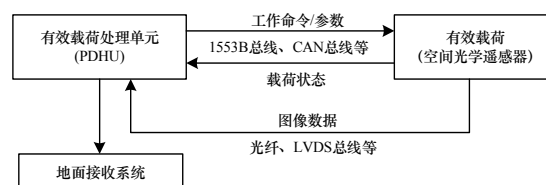


图 1 有效载荷控制原理框图

卫星在轨运行期间, 有效载荷处理单元与有效载荷(这里主要指空间光学遥感器)之间不断地进行信息的交互。一方面有效载荷处理单元向光学遥感器发送工作命令及参数, 另一方面接收光学遥感器返回的信息, 比如当前光学遥感器载荷的运行状态、拍摄到的可见光图像、超光谱图像、紫外图像等, 同时有效载荷处理单元及时向地面回传图像数据及相关信息。

#### 2.2 控制单元通信接口

卫星有效载荷控制系统与光学遥感器的控制单元最常用的通信接口为 1553B 通信总线, 完成最主要的命令发布、参数传递和状态反馈的任务。1553B 总线是一种集中式的时分

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目“空间薄膜反射镜关键技术研究”(2007AA12Z113)

**作者简介:** 王 栋(1979—), 男, 助理研究员、博士, 主研方向: 空间相机地面检测, 数字图像处理; 胡 君, 高级工程师

**收稿日期:** 2009-10-23 **E-mail:** wangdong983232@yahoo.com.cn

串行总线,其主要特点是分布处理、集中控制和实时响应。其可靠性机制包括防错功能、容错功能、错误的检测和定位、错误的隔离、错误的校正、系统监控及系统恢复功能。采用双冗余系统,有2个传输通道,保证了良好的容错性和故障隔离。早期的1553B是为适应飞机的发展而制定的一种标准的飞机内部电子系统联网标准,其后由于它的高可靠性和灵活性在航空航天电子设备中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。

### 2.3 空间光学遥感器仿真系统

在光学遥感器交付卫星总体实现之前,必须经过大量的用例测试和实验验证,因此,开发基于有效载荷处理单元工作原理的并能替代该单元工作的、用以检测设备功能、性能的地面仿真测试系统十分必要,并且这一仿真系统贯穿整个光学遥感器研制的始终。仿真系统的原理框图如图2所示。

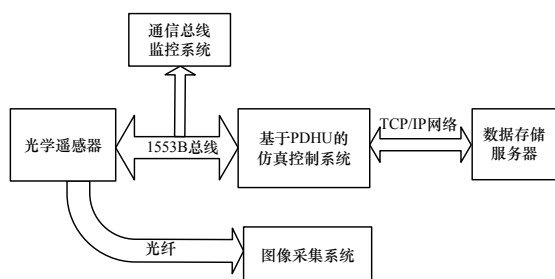


图2 仿真系统的原理框图

系统工作过程如下:

(1)基于PUHU的仿真控制系统模拟有效载荷处理单元发布各种操作命令与参数给光学遥感器,如相机拍摄的时刻、拍摄的方式、加热系统如何工作等,同时按照规定周期接收光学遥感器的状态返回,并对返回的数据进行解析,判定当前光学遥感器工作是否正常。

(2)仿真控制系统将所有发布的命令、参数和收到状态信息,通过以太网网络送给终端的数据存储服务器存储,以便进行后期的性能分析和问题定位。

(3)1553B总线仲裁与监视系统实时地监控整个1553B通道上的所有数据,并予以存储,仲裁通信中的问题。

(4)在规定的拍摄时刻,光学遥感器输出图像,图像采集系统开始工作,实时记录收到的图像数据。

## 3 精确定时方法

PDHU实时与光学遥感器周期性进行通信,每32ms向光学遥感器发出一次查询指令(称为查询指令周期);每512ms向光学遥感器发送一次卫星参数信息,同时返回光学遥感器当前工作状态(称为参数与状态周期)。要求定时精度不低于0.5ms。

应用计算机系统仿真PDHU的功能,按规定周期准确进行定时,常用的定时方法可分为以下4类:

(1)延时等待方式:循环执行一段已知精确用时的程序来实现。通常针对顺序执行的单任务系统,如单片机和DSP系统。在定时过程中CPU必须不停地执行延时等待操作,增加了CPU的负担,而且降低了执行效率。在Windows这样的多任务系统中,这种延时等待虽然也可以使用,但其可靠性将变得很差,无法保证CPU一直在执行规定的延时操作。

(2)定期查询方式:类似于延时等待的机制,区别在于不用事先去计算每一条指令的运行时间,借助某种外在的定时设备所产生的时间或频率,通过不停地查询一段程序执行前后的时间差来达到定时的目的。它与方式(1)一样,增加CPU

了负担,降低了程序执行效率,可靠性不高。

(3)内部软中断方式:采用已知频率的中断源触发CPU中断引脚来达到定时目的。CPU在中断定时的间隙可以做其他的工作,适合多任务操作要求。按照中断的来源可分为系统内部中断和外部中断。内部中断如Windows自身的系统定时器、多媒体定时器等,应用简单,不用外加设备,但定时精度较差,如VC中SetTimer定时函数的精度只有55ms,而多媒体定时精度略高,也只能达到几毫秒<sup>[5]</sup>。

(4)外部硬中断方式:在定时精度要求在1ms以内的多任务操作环境中,Windows自带的定时设备将不能满足要求,需要借助于外部中断来实现<sup>[6]</sup>,比如串口中断、并口中断、USB中断、PCI中断等。

为了满足实时测试中0.5ms的定时精度要求,本系统设计了基于FPGA的外部硬件中断电路,利用PCI中断的方式定时向CPU申请中断,驱动程序采用WDM方式编写,在中断回调函数中完成指定的定时操作。考虑系统硬件简化,没有外扩PCI协议芯片,将PCI协议做到了FPGA中,用Verilog语言予以实现,全部硬件设计只用一片Xilinx的FPGA Spartan2-XC2S200予以实现。

FPGA的嵌入式软件流程如图3所示。FPGA主时钟频率 $f$ 为48MHz,定时时间 $T$ 为指令查询周期。

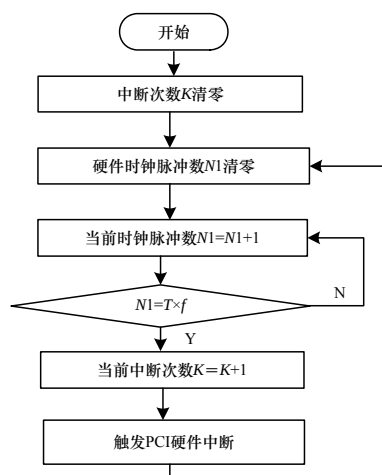


图3 FPGA的嵌入式软件流程

PCI中断处理流程如图4所示。

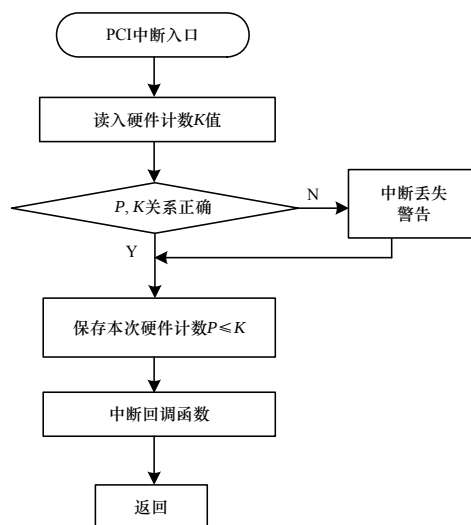


图4 PCI中断处理流程

中断回调程序处理流程如图 5 所示。

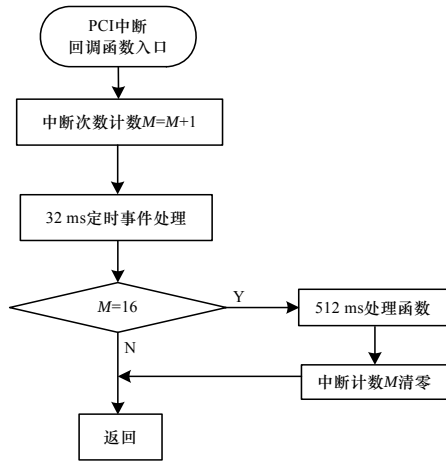


图 5 中断回调程序处理流程

这里一个最大特点是，在 PCI 定时中断触发的同时，读入硬件上的一个计数值  $K$ ，如图 4 中，判断与上一次读入的计数值关系，有 2 种情况认定为中断正确、无丢失：

- (1) 本次的  $K$  值比前一次的计数大 1；
- (2) 本次  $K$  值为 0，而前一次的值是有效计数的最大值。

如果不是这 2 种情况之一，说明中间有中断丢失，将给应用程序发出警告。通过这种中断的可靠性确认，为下面的中断定时任务安排提供了一个基准。

#### 4 多种任务的分类与协调实现

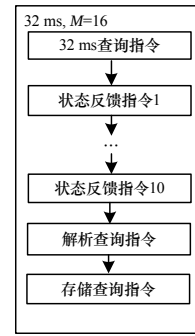
根据系统应用目的，要求所有指令按时发出、发出的指令与收到的数据及时地解析显示，同时要完整存储。常规的任务操作流程如下：指令发出→指令数据解析→指令数据存储。实际操作时发现，指令发出的速度最快，是  $\mu\text{s}$  级，而指令与数据的解析涉及到界面刷新、显示，存储涉及到网络传输与硬盘存储，这 2 项操作都较为耗时，都在几个毫秒以上。尤其在参数与状态周期定时(512 ms)到来时刻，会增加大量的指令操作任务，比如加入 10 项状态接收操作，按照常规的操作流程执行时，通过判断读回的硬件定时计数  $K$  值，发现  $K$  值不连续，定时中断有丢失，说明 32 ms 内不能完成的指定的全部操作。

针对以上问题，在分析任务特点后，对任务操作流程重新排列，原则如下：

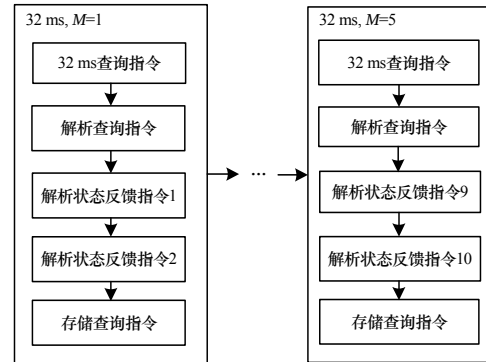
- (1) 指令发出的实时性要求最高，不允许有任何的延误；
- (2) 指令与数据的解析是为了方便观测与判断，实时性可略低于指令的发出，只要将延时控制在一定范围内即可；
- (3) 指令及状态信息的存储是为了事后查询及问题定位，确保不丢失任何信息即可，实时性要求可放至最低。

图 6 将 512 ms 时间分为 16 个 32 ms 的时间块，在每个时间块内按照任务实时性分析的要求，安排 4 项~6 项工作，通过判定硬件计数  $K$  值，确保这些任务在 32 ms 内可以完成。在  $M=16$  ( $M$  为上位机中断次数计数，用来标志某一个时间块)的时间块内要完成全部 11 项的实时任务，因此，本块内安排尽量少的解析和存储的任务；在其他的时间块内，实时任务较少，在完成实时任务后的剩余时间里可以按照重要性依次安排未完成的解析和存储任务。

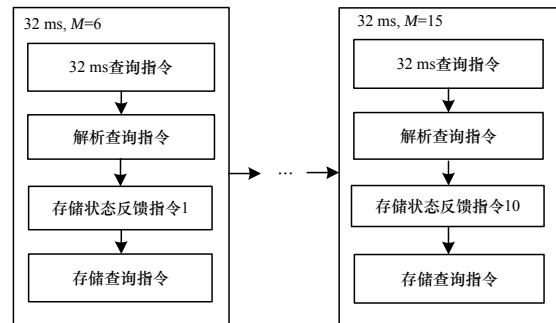
此例中指令解析的最大延时为 160 ms 左右，指令存储的最大延时为 480 ms 左右。



(a) 对应时间块内的指令发出操作



(b) 对应时间块内的指令解析操作



(c) 对应时间块内的指令存储操作

图 6 各时间块任务的执行顺序

#### 5 实验结果

表 1 对比了几种中断定时方法，定时时间为 32 ms。采用 VC 中 CPU 频率和计数函数来计算，用 QueryPerformanceFrequency 函数取得计算机内部的时钟频率，在 2 次 32 ms 的指令发送前调用 QueryPerformanceCounter 函数，利用 2 次计数之差与时钟频率，计算经历的精确时间<sup>[7]</sup>。这里给出了连续定时 5 次的测量结果。

表 1 几种定时测试的结果

| 定时方法 | VC 定时函数 | 多媒体定时 | 硬件定时  |
|------|---------|-------|-------|
| 1    | 46.22   | 30.71 | 32.05 |
| 2    | 41.24   | 30.65 | 32.08 |
| 3    | 35.50   | 30.89 | 32.10 |
| 4    | 32.61   | 31.01 | 32.05 |
| 5    | 46.84   | 30.70 | 32.10 |
| 均值   | 40.48   | 30.79 | 32.08 |

图 7 给出了采用本文硬件定时方法实现间隔 32 ms 定时的示波器实际测量到的指令波形，图中的指令间隔实测为 32.06 ms。通过软件计算和实际测量可以说明，采用硬件中断定时的方式能够有效提高定时的准确性，定时的精确度与稳定性都比 Windows 自身的定时函数效果好，达到 0.1 ms

的定时精度，满足仿真系统 0.5 ms 定时精度的要求。

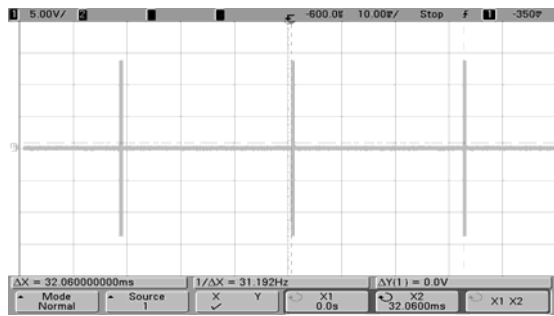


图 7 实测的指令间隔波形

该仿真系统成功应用于某型号空间光学传感器控制系统，测试的实例界面如图 8 所示，所有任务的执行、解析、存储都在规定时间予以实现。

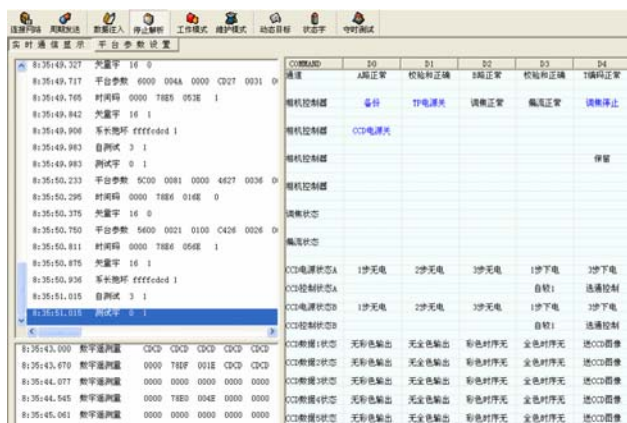


图 8 应用实例界面

## 6 结束语

为有效地对空间光学传感器控制系统的功能、性能、可靠性设计进行检测与监视，本文设计了基于 Windows 操作系统的光学传感器地面实时仿真测试系统。通过采用外接定时中断的硬件设备，解决了 Windows 下的精确定时问题，定时精度到达 0.1 ms，满足被测空间光学传感器控制系统 0.5 ms 定时精度的要求；通过对多种任务的分类考虑，重新排列了任务执行的顺序，实现了所有任务的按时执行、及时解析和正确存储，满足空间光学传感器控制系统仿真测试的要求。该设计已成功应用于部分型号的空间光学传感器。

## 参考文献

- [1] 吴旭光. 计算机仿真技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 陈向群. Windows 操作系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 康晓娜, 胡 君, 王 萍. 基于 Windows 仿真光学遥感微秒实时通信[J]. 微计算机信息, 2008, 24(11): 113-115.
- [4] 郭泽仁. 1553B 总线系统优化及可靠性设计[J]. 山东理工大学学报, 2008, 22(1): 67-70.
- [5] 周鸣籁, 邵 雷. Windows 环境下精确定时的实现[J]. 微计算机应用, 2001, 22(5): 309-313.
- [6] 崔玲丽, 高立新. Win2000 下实时中断计数的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(4): 16-17.
- [7] 谢 红, 李 松, 韩 放. 基于 Windows 的精确定时技术在 Link216 模拟中的应用[J]. 应用科技, 2006, 33(8): 40-43.

编辑 顾姣健

(上接第 6 页)

## 参考文献

- [1] 李德仁. 利用遥感影像进行变化检测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(特刊): 7-12.
- [2] 张东明. 地理信息系统原理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [3] Ying Shen. Modeling of Change-only Information and Updating of Spatial Data[C]//Proc. of XXI ISPRS Congress. Beijing, China: [s. n.], 2008.

- [4] Ying Shen, Li Lin, Liu Xiaofei, et al. Change-only Modeling in Navigation Geo-databases[C]//Proc. of ISPRS Workshop on DMGISs. Urumchi, China: [s. n.], 2007.

编辑 顾姣健

(上接第 9 页)

## 参考文献

- [1] Jeong M, Lee B. Comparison Between Path-loss Prediction Models for Wireless Telecommunication System Design[C]//Proc. of IEEE International Symposium of Antennas & Propagation Society. New York, USA: IEEE Press, 2001.
- [2] 段玉宏, 夏国忠, 胡 剑, 等. TD-SCDMA 无线网络设计与规划[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [3] Kadir M I, Tariq S A M. Radio Network Planning Models Based on Teletraffic Demand: Design, Implementation and Improvement

Issues[C]//Proc. of IEEE International Conference on Telecommunications & Malaysia and Communications. Penang, Malaysia: IEEE Press, 2007.

- [4] Jin Kyu Han, Byoung Seong Park, Yong Seok Choi, et al. Genetic Approach with a New Representation for Base Station Placement in Mobile Communications[C]//Proc. of VTS'01. [S. l.]: IEEE Press, 2001.

编辑 陆燕菲