

# 创新一号小卫星星载计算机控制系统设计

王平<sup>1,2</sup>, 孙宁<sup>2</sup>, 李华旺<sup>2</sup>, 包海超<sup>2</sup>, 尹增山<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>2</sup>

(1. 西华大学电气信息学院, 成都 610039; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

**摘要:** 对创新一号小卫星的星载计算机系统的设计进行了介绍, 作为我国第一颗重量在 100kg 以下的小卫星, 创新一号星载计算机采用了多项国内首次使用的新技术, 经过一年的飞行测试验证, 证明了卫星计算机系统的安全可靠, 该文就星载计算机系统的主要特点和采用的可靠性设计技术进行了较深入的研究, 反映了创新一号星载计算机系统所获得的主要成绩。

**关键词:** 卫星; 星载计算机; 硬件; 软件

## Design of On-board-computer Control System for CX-1 Micro-satellite

WANG Ping<sup>1,2</sup>, SUN Ning<sup>2</sup>, LI Huawang<sup>2</sup>, BAO Haichao<sup>2</sup>, YIN Zengshan<sup>2</sup>, LIU Haitao<sup>2</sup>

(1. College of Electric and Information, Xihua University, Chengdu 610039;

2. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology, China Academy of Sciences, Shanghai 200050)

**【Abstract】** This thesis introduces the OBC(on-board-computer)of CX-1 micro-satellite, being the first micro-satellite of China under 100 kilogram, the OBC of CX-1 adopts some new fault-tolerant technologies, which improve the reliability of the micro-satellite. It has run normally in orbit over one year, and the reliability of the micro-satellite is verified. The OBC lives through the SEUs(Single Event Upset) many times and still does good job by now. The thesis shows the main characters and the design blueprint of the OBC. The main technology of reliability of the OBC is also projected.

**【Key words】** Satellite; On-board-computer; Hardware; Software

### 1 创新一号小卫星概述

创新一号小卫星是我国自行研制的第 1 颗重量 100kg 以下的微小卫星, 是中国科学院知识创新工程重大项目。创新一号存储转发通信小卫星系统于 1999 年 4 月正式启动, 2002 年 7 月完成飞行星的研制并运至太原卫星发射中心准备发射, 后因其他原因推迟发射, 2003 年再次进场于 10 月 21 日成功发射入轨。创新一号由中国科学院上海微系统与信息技术研究所、上海技术物理研究所共同组建的中科院上海小卫星工程部承担研制。在卫星研制的同时, 项目组还研制了地面测控通信系统和手持通信终端, 与相关用户共同组建了上海、北京、新疆、海南等 4 个地面站和 1 个测控中心, 负责卫星在轨测试和运行测控管理等任务。

到 2004 年 2 月 19 日, 创新一号在轨正常运行 119 天。在这期间, 它经受了 2 次强太阳暴, 安全抵御了 29 次单粒子事件。卫星平台工作平稳, 有效载荷工作正常, 整星状态良好, 全部功能完全达到了设计指标。该卫星的运行和地面系统的测控和各项试验均取得了圆满成功, 并顺利通过了专家组的验收。作为我国首颗成功发射的重量在 100kg 以下的自主研制的低轨道通信卫星, 创新一号小卫星具有较高功能密度, 在低轨道通信技术、大多普勒频移的数据通信技术、测控与通信业务信道共用设计、星上轨道预报和卫星自主管理运行、主动磁控的三轴稳定姿态控制技术、微型化卫星通信终端等方面有较大创新。卫星及地面系统具有成本低、重量轻、功耗小、研制周期短、高可靠等特点。通过该项目的实施, 为中国科学院开展现代小卫星及其应用技术研究, 并由此带动相关高技术研究的开展, 创造了条件, 也为我国发

展低轨道通信小卫星积累了宝贵经验。

创新一号这种低轨通信卫星在交通运输、环保监察、探险救援、工农业数据、油气运输、防汛抗旱、森林火灾、地震监测等领域有广泛的应用前景, 将成为我国为国民经济建设服务的一种新的卫星类型。

### 2 创新一号星载计算机系统结构

创新一号星载计算机是创新一号小卫星的重要组成部分, 是集数管遥测遥控与姿轨控于一体的高性能、高功能集成、高可靠、长寿命的星载计算机, 为了保证创新一号在轨期间能长期稳定可靠地运行, 在设计中吸收、继承和发展了国内外小卫星星务管理计算机研制的成功经验, 同时采用新技术提高计算机的控制能力, 使计算机在设计上体现了功能强、体积小、重量轻的特点, 整机硬件采用双机冗余机构设计, 软件设计采用软件集中管理方式。由于卫星恶劣的空间环境, 星载软件应该具有较高的容错能力, 并能在一定情况下的软件死锁中恢复出来, 这就要求操作系统本身具有一定的容错纠错能力。因此, 设计中星务管理还要对星载软件所采用的操作系统内核作一定扩展, 使之能满足要求。

星载计算机采用集中管理模式, 同时完成数据管理和姿

**基金项目:** 中国科学院特别支持创新工程基金资助项目(KGCX1-Y-03); 上海市科委基金资助重大项目(005115001)

**作者简介:** 王平(1970—), 男, 博士、副教授, 主研方向: 嵌入式计算机系统, 信息处理及信息融合, 集成传感器系统; 孙宁, 硕士、副研究员; 李华旺, 博士、副研究员; 包海超, 硕士、助理研究员; 尹增山, 博士、副研究员; 刘海涛, 博士、研究员、博导

**收稿日期:** 2005-12-26 E-mail: ping\_wang@126.com

轨控制计算机的功能，主要任务有：星上数据处理分析，生成自主管理的控制信号；星上自主测轨、定轨、轨道预报的数据管理；整星综合信息星务管理；姿态分系统的姿态控制与管理；通信分系统的遥测遥控与通信管理；热控分系统的管理；红外地平仪数据接收；星上时间功能；星上测温功能；数据存储功能；直接指令遥控功能等。创新一号的星载计算机在硬件上主要采用了双机冗余热备份的工作方式，由切换逻辑进行双机切换控制，图 1 示出了创新一号星载计算机功能结构。

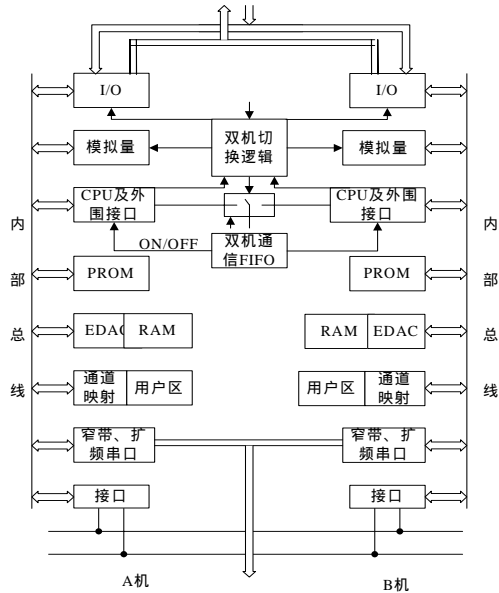


图 1 星载计算机结构

### 3 创新一号星载计算机软件

星载软件是星载计算机完成设计功能的重要部分，星载软件完成对软件系统运行模式管理和各应用进程的任务级管理，包括双机管理、模式确定、模式切换、任务启动、进程运行监控、进程切换、进程重启、间接遥控、GPS 接收机管理、轨道预报、通信上下行、姿态控制、电源控制、热控、遥测数据处理等。

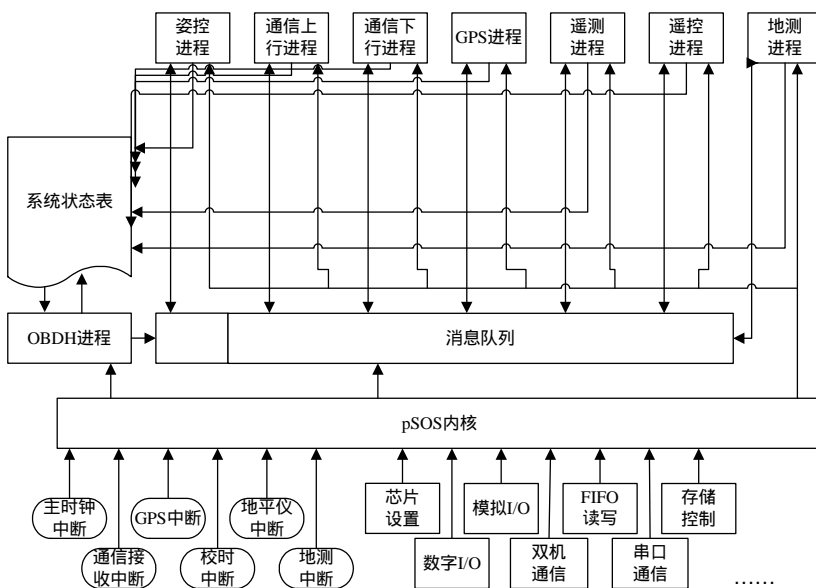


图 2 星载软件结构

创新一号星载软件主要完成以下任务：姿态控制；通信；星务管理；热控；电源管理；GPS 接收机管理；定轨和轨道

预报；间接遥控；遥测；星上时；BSP 底层驱动；中断管理；内外存管理；定时；任务管理；地测支持；模式管理；注入程序管理等，其总体结构如图 2 所示。由于创新一号采用集中式管理方案，星载计算机成为整星的核心，因此几乎所有卫星分系统和星载设备的正常工作都需要星载软件的干预。星载软件各部分及其主要功能如下：

设备驱动程序提供操作系统或应用程序对硬件设备的驱动，操作系统或应用程序调用设备驱动程序完成对外围设备的管理工作，是建立软件和硬件之间的桥梁。底层设备驱动程序和硬件设备密切相关，主要功能包括程序的初始化、硬件设备的初始化、中断服务程序的处理和上层应用程序的接口管理等。

星务管理软件是星载软件的核心，星务管理任务由主时钟中断服务程序与星务进程配合完成。这部分软件完成对软件系统运行模式管理和各应用进程的管理，包括双机管理、模式确定、模式切换、任务启动、进程运行监控、进程切换、进程重启等。

创新一号是三轴稳定、对地定向的存储转发小卫星，因此对姿态控制系统的要求特别严格。与此相关的姿控软件是星载软件和姿态控制系统的重要组成部分，它包括姿控遥测和姿态控制两个部分，姿控软件主要功能要求是：可靠、有效地对姿控单机进行信号处理、控制，完成卫星在轨姿态确定和姿态控制；实现各控制机构之间的冗余备份；保证故障状态下卫星姿态自我校正和控制模式之间正确切换；在初始数据丢失时能够正确恢复当前控制状态，能够实现模式重组。

GPS 接收机及轨道软件的主要任务是为其其它进程提供轨道数据，并对 GPS 接收机进行监控、管理、数据接收和数据数据处理。接收 GPS 接收机发来的数据帧，完成数据帧的解帧、数据的搬移、数据的存储；接收 GPS 接收机校时中断，进行星上自主校准时间；地面注入的轨道数据的接收和使用。对 GPS 接收机的开关机及复位进行控制管理，避免 GPS 接收机的死锁；对 GPS 接收机发送轨道预报命令；对 GPS 接收机发送预报数据请求命令；为各个进程提供其所必需的轨道数据。

通信软件完成通信上下行数据的处理，上行完成对窄带接收机 A、窄带接收机 B、扩频接收机 A 和扩频接收机 B 上行数据的接收处理，读取上行 FIFO 暂存的通信数据，从中找出完整的通信数据帧，并进行校验、解帧并根据数据类型对数据进行相应的处理。下行完成通信系统测控管理、出入境操作、通信模式管理和数据下行发送操作。通信软件要求完成对接收机、LNA 和 DSP 的开关机和复位的管理。

电源管理软件完成的任务包括遥测量采集，遥控命令接受和执行，蓄电池组电压采样计算，蓄电池组充电终止电压理论设定值计算，充电过程控制以及二次电源主备份切换等。

遥测软件完成对卫星软硬件遥测参数的采集、压缩、组帧、存放和下发的功能。

遥测软件从卫星飞程序的主动段开始，之后就一直运行，在运行过程中，将根据当前星上时判断是否应该采集遥测数据、是否应该组帧，在条件满足的情况下采集或组帧，并将

遥测帧送入外存为遥测分配的空间中存储,以备通信下发。

遥控软件是地面测控系统对卫星各设备以及软件系统的运行进行干预的最主要通道。遥控软件运行过程中,将检索是否有有效的间接遥控指令送入星载计算机,如果有,就判断是否满足执行条件,如满足条件,就执行。

热控软件采集遍布整星的温度传感器数据,进行整星温度计算和分析,当整星的温度分布不能满足星载设备的正常工作条件时,进行主动温度控制。温度控制的执行机构为两个加热器,所以只能在温度低于设定条件时对整星进行加温;因为温控任务相对重要性要低一些,只有在能源供应许可的情况下才能进行加温控制。

注入软件是在卫星运行中可以随时添加到星载软件中的部分,并可以随时替换,以完成某些在星载软件开发时没有涉及的功能,从而使星载软件系统具有更大的灵活性,其内容可以根据卫星运行时任务的需要而适时编写,经过测试验证后,通过通信站注入卫星,创新一号在星载软件中预留了注入进程,以备卫星功能扩展或当卫星故障时实现恢复。

#### 4 创新一号星载计算机系统工作模式

创新一号星载计算机系统的工作模式根据卫星飞行所处阶段和计算机的工作状态不同,共分为4种模式:

(1)地面测试模式。卫星升空前在地面进行的各种调试、模拟试验均属地面工作模式,星务管理计算机将星上状态、测试结果、控制量等信息通过星地485串口传至地面测试设备,供调试、测试、结果分析等使用。

(2)姿态捕获模式。卫星升空时,星箭分离信号启动星载计算机运行应用进程,并进入姿态捕获模式。OBDH完成初始状态的捕获和控制,消除星箭分离等因素对姿态造成的影响。

(3)在轨正常工作模式。星载计算机进入正常工作状态,主机运行,完成星务管理任务,同构备份机热备份工作,随时准备接替主控机运行。

(4)故障运行模式。星载计算机通过故障检测和切换逻辑对自身故障进行隔离,通过系统重构,由备份机接替控制权,使得星载计算机仍然能够满足卫星正常运行的基本需求。

#### 5 小结

创新一号是我国自行设计研制的第一颗重量在100kg以下的微小卫星,通过对星载计算机硬件与软件的各项测试表明:星载计算机完全达到了设计的任务要求,星载软件的设计正确可靠,星载计算机采用了集中管理方式,并使用了多项硬件软件化措施,减小了卫星的体积、降低了重量,实现了卫星的小型化,可以完成对卫星工作的正确管理,经过运行测试和整星联试,表明是可靠和稳定的,在卫星在轨飞行期间,出现了多次差错,但由于星载计算机控制系统容错设计比较完善,因此没有引起卫星运行故障,说明创新一号小卫星的容错设计很好地保证了卫星的可靠性。

#### 参考文献

- 1 王平. 小卫星软件遥测方案及模块化设计方法[J]. 量子电子学报, 2004, 21(6): 392-395.
- 2 王平, 杨根庆. 基于组件的运行中可重组嵌入式软件的设计实现[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(8): 158-162.
- 3 张凯, 赵宏坤, 刘海涛. CX-1小卫星实时多任务操作系统的设计[J]. 量子电子学报, 2002, 19(4): 158-161.
- 4 王平. 软硬件协同电源容错控制系统的验证[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(5): 157-159.
- 5 宋征宇. 双CPU环境下飞行控制软件的设计[J]. 宇航学报, 1997, 18(6): 86-90.

(上接第247页)

#### 3 ECC协处理器的性能分析

文中的ECC协处理器的开发是基于一个SOC平台的,该SOC平台由CPU、RAM、EEPROM、RNG(硬件随机数发生器)和ECC协处理器等构成,可以完成通常意义上的加密、解密、摘要等运算。本文主要讨论了ECC协处理器的设计,它采用ASIC的设计流程,并从算法分析、结构设计、C语言验证、Verilog代码描述、ModelSim仿真到FPGA板进行了各个方面的验证,充分保证了硬件的正确性。点乘部分采用固件程序(Firmware),使用Keil C51开发环境进行编码、优化和编译。综合采用Synopsys的DC工具,元件库用SMIC的0.35 $\mu$ m的单元库,芯片面积估计在6mm<sup>2</sup>左右。整个SOC的工作频率为10MHz,完成一次点乘需要52.23ms,最高工作频率可达50MHz,比文献[4]中实现的速度要快。

#### 4 结论

本文结合智能卡的应用环境,设计了一种高效、低成本的192位p元域的椭圆密码芯片的实现结构。对于KP运算,给出了一种新的控制算法,使其能够最大程度上利用前面的运算结果而又不增加太多的寄存器。对于核心运算模乘,利用Montgomery算法,给出了一种改进的算法和结构。若使

用ElGamal数字签名方案,工作在10MHz频率下,则该卡每秒可以进行约10次签名。

#### 参考文献

- 1 Jamnes G, Anantha P. An Energy Efficient Reconfigurable Public Key Cryptography Processor[J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2001, 36(11): 1808-1820.
- 2 ZHOU H H. Research on the Architecture and Implementation of Block Cipher Algorithm(ECC and IDEA)[D]. Shanghai, China: EE Dept. of Fudan Univ., 2000.
- 3 Bunimov V, Schimmler M. Area and Time Efficient Modular Multiplication of Large Integers[C]. Proc. of the 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Application Specific Systems, Architectures and Processors, 2003-06.
- 4 Savas E, Tenca A F, Koç C K. A Scalable and Unified Multiplier Architecture for Finite Fields Gf(p) and Gf(2)[M]. Cryptographic Hardware and Embedded Systems. Springer-Verlag, 2000.
- 5 Satoh A, Ooba N, Takano K, et al. High Speed MARS Hardware[C]. Third Advanced Encryption Standard Candidate Conference, 2000-04.