

空间光通信系统可靠性设计与实现

王 岩, 杨奇峰, 贾 琪, 郑燕红

(哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了光通信系统可靠性设计的硬件和软件方法, 设计和实现了一种新的高可靠性代码存储方法, 对用传统的 FLASH 存储加载程序与用 FRAM 存储加载程序的方法进行了对比, 通过将代码存放在 FRAM 中, 用 SPI 引导加载的方法有效提高了代码存储加载的安全性。

关键词: 代码安全性; 光通信; 引导加载; FRAM

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0012-04

Reliability Design and Realization of the Optical Communication System

WANG Yan, YANG Qi-feng, JIA Qi, ZHENG Yan-hong

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The method to design the reliable optical communication system are given, the new high reliability storage of the code are designed and realized, the two methods memorying and bootloading from flash or from FRAM are compared, results showed that storing the code in the FRAM, and using the SPI to Bootloader improve the safety of codes' storage and bootloader effectually.

Key words: security of the code; optical communication system; bootloading; FRAM

1 引言

空间电磁干扰是影响卫星在轨生存能力的重要因素, 其中单粒子效应所产生的单粒子翻转、单粒子锁定尤为突出。星载计算机是卫星上的核心部件, 担负着航天器的数据处理与传输、控制各种操作的执行和星务管理等方面的工作, 在严酷的辐射环境中, 保证星载计算机上代码的可靠性和安全性是实现卫星在轨功能的重要保证。空间光通信粗瞄控制子系统的数据处理单元, 上承主控单元, 下接控制器, 在实现目标位置解算的同时, 要实现有效的数据双向传输。为满足项目的可靠性要求, 系统在硬件和软件设计方面都做了加固设计, 并且在代码的存储层面上进行了更加可靠的设计。主芯片采用 TI 公司的

TMS320LF2407A, 芯片本身带有大容量的 FLASH 存储器, 但 FLASH 存储器的抗电磁干扰能力比较弱, 为了提高卫星在宇宙环境中的代码存储安全性, 本文探索性地使用了一种抗干扰能力强的存储介质 FRAM 存放代码, 在系统上电时从外部将代码引导加载到系统的 RAM 中运行。FM25C160 是 Ramtron 公司生产的具有 16kB 存储容量的铁电存储器, 支持标准的 SPI 接口。相比 FLASH, 由于铁电效应是铁电晶体所固有的一种偏振极化特性, 与电磁作用无关, 所以 FRAM 存储的内容不会受到外界条件 (诸如磁场因素) 的影响, 因此具有很高的稳定性。本系统由于可靠性设计需要, 对以上技术进行了有意义的探索, 经过反复实验, 系统实现了预定的功能, 为实际系统参照使用奠定了基础^[1-2]。

收稿日期: 2009-06-29; 修回日期: 2009-08-29

基金项目: 国家“九七三”计划项目(973-10007.07-LB7)

2 光通信数据处理单元可靠性设计

在光通信项目中,通过方案及电性测试阶段可靠性初步预测,在卫星寿命末期,光通信终端成功工作的概率不低于 0.75. 具体到终端控制子系统,设计的可靠性指标要求为 0.95,微电路质量等级一般情况下不低于 B1 级,对于在终端起关键作用的微电路,质量等级不低于 B 级.

为满足可靠性要求,在光通信终端子系统中,在硬件和软件中都有增强系统可靠性的设计.

在硬件中采取的措施有以下几个方面:

(1) 选用的电子元器件应能承受若干年空间环境的辐射能力,满足抗辐射总剂量的技术指标,避免使用单粒子翻转效应截面较大的 TTL 器件.

(2) 为防止程序运行过程中由于空间干扰出现程序走向混乱的现象,系统设计了看门狗单元.

(3) 为防止出现冲击电流对控制系统产生毁灭性影响和单粒子锁定现象,在电路的设计中使用了限流电阻.

软件方面采取抗干扰设计、容错设计、纠错码设计进行软件加固,提高程序的自我保护能力,以减少由单粒子翻转引起的软错误.采取的措施有以下几个方面:

(1) 选择递归循环结构的设计,使其满足初始的可靠程序设计技术和程序自我验证技术.

(2) 程序结构模块化,模块口应设置访问权限,防止非法侵入,并便于保留现场及故障隔离.

(3) 采用设置当前输出状态寄存器单元,以及时查询寄存器单元的输出状态、信息并纠正输出状态和设置自检程序,在某些特定部件或内存单元设置状态标志,在运行程序的过程中不断循环测试,及时纠正输出状态的方法防止控制状态失常.

(4) 加入时间陷阱设置,刷新中断向量,换址加载运行,设置软件陷阱等方法增强软件自我保护能力.

(5) 采用了冗余控制及冗余编码技术.

卫星在空间飞行时,代码的存储单元受到干扰而出现永久性反转效应时,对航天器的正常工作将是致命的,数据处理单元核心芯片 2407A 片内拥有 32kB 的 FLASH 存储器在宇宙环境中的电磁干扰和单粒子效应下内部存储的程序很容易被破坏,而 FRAM 采用铁电效应,利用它作为程序存储器件实现程序的外部引导,可以有效地提高系统的抗干扰能力.

所有 CMOS 集成电路芯片按超大规模计算,采用如下公式计算失效率:

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_B] \pi_L$$

式中, π_Q 是质量系数, π_T 温度系数, π_V 电压应力系数, π_B 环境系数, π_L 成熟系数, C_1 、 C_2 为电路复杂度系数. FLASH 存储器与 FRAM 存储器的 C_1 与 C_2 不同,在其他参数相同的情况下,后者的 C_1 与 C_2 更小,所以 FRAM 可靠度明显好于 FLASH,而且铁电效应是铁电晶体所固有的一种偏振极化特性,与电磁作用无关,所以 FRAM 存储的内容不会受到外界条件(诸如磁场因素)的影响,相比之下,将代码存放到外部 FRAM 通过 SPI 引导加载程序的方法可以有效提高代码存储的安全性^[3-4].

3 代码引导加载实现

TMS320LF240x/240xA DSP 具有引导加载代码,这些代码在系统复位的时候从外部串行器件加载程序,并且对从外设加载的程序进行传输控制.程序代码可以加载到用户指定的位置,这个位置可以是程序存储区的任何位置.利用 TI 公司的代码格式化工具,使用片内引导 ROM,可以方便的把程序从外部引导到 RAM 中运行.下面介绍具体的实现方法.

3.1 DSP 与 FRAM 接口电路

图 1 是实现外部加载的硬件电路原理图,实现 SPI 外部加载的存储器选用的是 Ramtron 公司的 FM25C160.

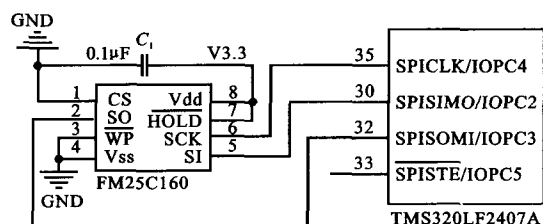


图 1 外部加载硬件原理图

3.2 引导加载硬件配置

为了实现有效的引导 ROM 和引导加载,必须按如下顺序正确地设置:

① 将 TMS320LF2407A 的 MP/MC 引脚拉低,从而工作于微控制器模式.

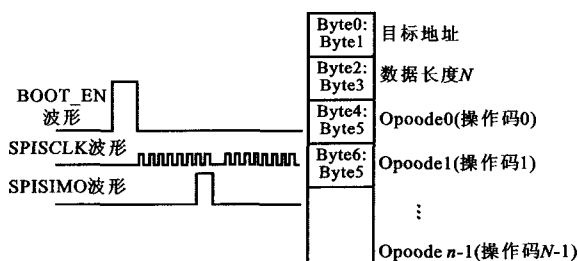
② 启用引导 ROM 加载器.在器件复位前,使用下拉电阻将 BOOT EN /XF 引脚拉低,从而激活引导加载器.

③ 通过 IOPA0 引脚的状态设置 PLL(锁相环)的倍频因子.

④ 将 SPISIMO/IOPC2 引脚拉高, 启用 SPI 传输.

3.3 SPI 引导加载协议定义

加载程序时, 数据的传输是按照定义的 SPI 传输协议进行的. SPI 的数据传输为同步传输. SPI 按图 2 表示的传输过程传输, 按照引导加载协议, 存储在 FRAM 中的程序必须具有引导表所示的结构, 进入加载过程后, 一旦最后一个字被保存, 则一个程序分支在目标地址的代码中生成, 引导载入代码的入口点必须为目标地址.



引导装载时各管脚时序(实测得到) 引导表结构

图2 SPI的数据传输过程

3.4 引导程序的编写

为了实现上电后程序的加载, 必须首先将应用程序按照如图 2 所示的引导表格式写入到 FRAM 中, TI 没有提供专门的工具进行烧写, 这个工作需要用户自己进行. 具体步骤如下:

(1) 编写应用程序(例如测试程序 text.c), 在 CCS2000 中编译、连接后生成 tex.out 文件.

(2) 生成的 text.out 文件不仅包含了程序代码, 而且包含了文件头、符号表、段地址、初始化段入口等其他信息, RAM 不支持这种格式, 需经过相关处理再发送至控制端. 具体处理步骤为: 利用 dsphex 工具将 COFF 格式文件转换为 HEX 格式文件. 例如, 执行: dsphex.exe - text.out - o text.hex; 输出文件 text.hex 是符合 TI 格式的 16 进制文件. 对生成的 HEX 文件进行提取、插补, 生成段格式如下的文件. 段格式: SectAddrN + CodeLenN + CodeN + SectEndFlag + (xx), 其中 SectAddrN—第 N 段的起始地址; codeLenN—一段 N 代码长度; CodeN—一段 N 代码正文; SectEndFlag—一段结束符; (xx)—紧跟段结束符的两位 16 进制数; 00—还有其他段; aa—代码全部结束.

(3) 将二进制文件中的数据(机器码)写入到 FRAM 中.

为了把应用程序的二进制文件写入到外部

FRAM 中, 需要编写一段烧写程序, 在程序中,

把应用程序的二进制文件放到了一个数组里, 然后通过 JTAG 仿真与调试接口写入 FRAM 中. 烧写程序的流程图见图 3.

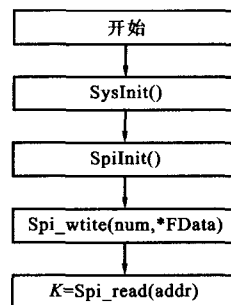


图3 支持 SPI 协议的烧写程序流程图

在 CCS2000 下, 用 C 语言编写的烧写程序如下:

```
main()
{
    Uint16 k=0; //用来检验烧写是否正确
    SystemInit(); //系统初始化
    SpiInit(); //SPI 初始化
    k = READ_SR(); //读 SPI 状态寄存器的值, 上电后, 系统状态寄存器的值为 80
    FramInit(); //Fram 初始化
    spi_write(526, p_data); //往 Fram 里写程序, 其中 //526 位写入的字节数, 不同的程序值会不同
    k = spi_read(0x0000); //从任意地址读数
    k = spi_read(0x0003); //从任意地址读数
    k = spi_read(0x0209); //从任意地址读数
    k = spi_read(0x020C); //从任意地址读数
    while(1)
    { ; }
```

将符合引导表格式的文件写入到 FRAM 中后, 按图 2 中的设置配置系统, 重启系统, 便可实现系统的外部程序加载^[5-6].

4 可靠性验证

空间光通信硬件和软件的可靠性设计经过实际的应用显示, 可以有效提高卫星工作的稳定性和可靠性, 提高卫星的在轨生存能力. 相对利用 2407A 内部的 FLASH 进行代码的存储, 由于 FRAM 利用铁电晶体所固有的一种偏振极化特性, 具有很强的抗干扰能力, 用它实现的程序外部加载方法有效地提高了代码存储的安全性, 多次实验显示, 此方法安全可靠.

5 结束语

卫星系统硬件和软件加固的方法有效地提高了系统的可靠性,本文所述的通过 TMS320LF2407A 的 SPI 接口实现从外部 FRAM 中引导加载应用程序的方法,提高了代码存储的安全性,经过多次实验,此方法稳定可靠,为星载计算机的软件存储安全进行了有益的尝试,可以作为代码存储安全设计的参考^[7].

参考文献:

- [1] 江思敏. TMS320LF240x DSP 硬件开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 丁义刚. 空间辐射环境单粒子效应研究[J]. 航天器航天工程, 2007, 24(5): 283-292.
- [3] 何江红. 封装器件可靠性快速评估的研究[J]. 微电子学与计算机, 1996, 13(2): 6-10.

- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320LF/LC24 系列 DSP 指令和编程工具[M]. 徐科军, 肖本贤, 张兴, 等, 译. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] 王志梅, 王丽军, 刘正高. 航天型号可靠性信息系统软件的设计与实现[J]. 质量与可靠性, 2008(6): 45-47.
- [6] 李芳华. 星载软件可靠性设计方法[J]. 上海航天, 2003(3): 24-27.
- [7] 刘军华, 刘文平, 唐威, 等. DSP 芯片外部存储器设计一例[J]. 微电子学与计算机, 2003, 20(3): 17-20.

作者简介:

王 岩 男, (1972-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为计算机控制、空间光通信控制.

杨奇峰 男, (1985-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制、嵌入式系统.

贾 琪 男, (1986-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制、嵌入式系统.

(上接第 11 页)

- [2] 王得力, 高德远, 张骏, 等. 32 位嵌入式 CISC 微处理器设计[J]. 微电子学与计算机, 2009, 36(5): 291-295.
- [3] Hennessy John L, Patterson David A. 计算机系统结构——量化研究方法[M]. 3 版. 郑纬民, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.

作者简介:

杨 坤 男, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为专用集成电路设计、微处理器体系结构.

高德远 男, (1946-), 教授, 博士生导师. 研究方向为计算机体系结构、VLSI 系统设计.

黄小平 男, (1980-), 讲师. 研究方向为专用集成电路设计、VLSI 系统设计.