

空间辐射环境引起在轨卫星故障 分析与加固对策

周飞, 李强, 信太林, 韦锡峰, 张华
(上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 文章对卫星由于空间辐射环境导致的在轨故障进行了统计; 对某卫星数传综合处理器在轨单粒子翻转故障的现象、机理和措施等进行了分析; 根据在轨故障案例、实际工程经验和仿真分析, 从硬件和软件两方面提出了具体的降低单粒子效应的多种抗辐射加固设计方法, 以延长卫星在轨工作寿命。

关键词: 卫星; 单粒子翻转; 在轨故障; 抗辐射加固

中图分类号: V417.7; V419.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)04-0392-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.04.006

0 引言

空间辐射环境主要由地球外辐射带粒子(主要成分是质子和电子)、太阳耀斑(主要是质子和 α 粒子)以及银河宇宙线等^[1]组成, 容易对在轨运行的卫星产生总剂量效应、单粒子效应以及充放电效应。这些环境效应严重威胁到卫星的长寿命和高可靠稳定运行, 是引起卫星故障的重要原因之一^[2-3]。

目前, 国内对卫星抗辐射加固工作已经比较重视, 但仍有少数设计人员存在对空间环境认识不足、过分依赖经验、缺乏抗辐射设计知识等问题, 设计不到位使得卫星因空间环境导致的在轨故障时有发生。如某型号卫星数传综合处理器多次出现FPGA单粒子翻转事件, 导致地面接收到的数据发生了若干次异常现象, 影响了图像数据的正常获取, 主要原因是对FPGA单粒子翻转及产生的危害估计不足。

本文首先分析不同轨道卫星遭遇到的空间环境以及卫星的易损性, 然后统计航天某院在轨卫星因空间辐射环境导致故障的案例, 并分析故障产生机理和采取的相关措施, 综合以前经验积累, 最后得到卫星抗天然环境辐射的典型设计方法。本文部分研究结果已在相关型号上得到应用, 其结论可用于指导现有型号的环境与可靠性设计。

收稿日期: 2011-12-12; 修回日期: 2012-04-15

基金项目: “十二五”支撑技术预研课题

作者简介: 周飞(1983—), 男, 博士学位, 主要从事空间辐射环境分析、抗辐射加固设计以及卫星可靠性设计等方面的研究。Email: zhouf05@gmail.com。

1 卫星辐射损伤分析

空间辐射环境中的带电粒子对航天器材料、微电子器件、光学窗口、温控表面、搭载生物样品及航天员等均会产生辐射损伤, 是目前航天器在轨异常和失效的重要原因之一。空间辐射对卫星主要元器件可能产生的辐射效应如表1所示。

表1 卫星部分元器件的辐射效应
Table 1 Radiation effects on parts of satellites' electronic devices

器 件	隶属功能块	可能发生的辐射效应
FPGA、DSP、SRAM等	时序发生电路 数据合成电路	电离总剂量; 单粒子翻转; 单粒子瞬态干扰; 单粒子锁定。
MOSFET驱动器	驱动电路	电离总剂量; 单粒子瞬态干扰; 单粒子烧毁; 单粒子栅击穿。
双极型运算放大器	滤波电路	电离总剂量、单粒子瞬态干扰。
视频处理专用器件	视频信号处理电路	电离总剂量; 单粒子翻转; 单粒子瞬态干扰; 单粒子锁定。
CCD	探测器	电离总剂量; 位移损伤总剂量。

2 在轨卫星故障案例统计与分析

2.1 故障统计结果

从2004年10月到2011年8月, 航天某院在轨卫星由于空间环境造成的故障案例共有7起, 详见表2。

表2 空间环境造成的卫星在轨故障案例
Table 2 On-orbit failures caused by space radiation environment

序号	单机名称	在轨问题描述	故障定位	措施落实
1	GPS 接收机	遥测 GPS 定位数据全“0”。单机重启后,恢复正常工作。	在轨单粒子翻转造成软件通道选星工作异常。	1) 关键数据进行三备份处理和三取二判读。 2) 修改 GPS 软件,在接收机出现 0.5 h 以上非定位现象时,自主复位。
2	消旋组件	多次消旋短暂失锁导致不能对地定向,与地面的通信中断。	高能电子造成卫星表面高负电位充电或星内深层充电,从而引发卫星静电放电,造成地球敏感器“地”中脉冲信号异常,并导致天线消旋短暂失锁。	对后续星的电缆设计、加工工艺和接地状态进行了充放电防护设计,电缆插头尾罩根部采取密封屏蔽处理。
3	遥测机 A	卫星遥测机 A 机遥测采集速度加快,导致一级分频失效。	经地面分析、试验,认为很可能是由于 FPGA 单粒子翻转。	切换至 B 机,到目前为止,遥测机 B 机工作正常。
4	数传综合处理器	地面遥测收到数传综合处理器若干次异常数据,影响了图像数据的正常获取。	由于空间环境导致 FPGA 发生单粒子翻转,使得 FPGA 功能异常,引起在轨的异常现象。	1) 每次数据回放完毕后关机,首次成像任务前开机。 2) 后续 02 星对存储介质、FPGA 等芯片进行防护设计。
5	数传下位机	数传下位机在轨双总线无应答,分系统的遥测全部为“0xaa”。	SRAM 受单粒子效应影响是最有可能导致数传下位机在轨指令无应答的原因。	通过对数传分系统关机后再加电,使下位机和分系统工作恢复正常。
6	太阳辐射监测仪	太阳辐射监测仪热电遥测出现超差。	根据遥感数据中采样次数被改为 C8H,可以认为故障为单粒子翻转造成的。	太阳辐射监测仪关机后再加电,使单机工作恢复正常。
7	姿轨控计算机	姿轨控计算机与太阳电池阵驱动器通信出现异常,驱动机构已自主归至零位。	姿轨控计算机通信板 FPGA (Xilinx 公司,30 万门) 受单粒子效应影响所致。	1) 对于在轨 01 星,姿轨控计算机先由 A 机切换到 B 机工作,然后由 B 机切换到 A 机工作。 2) 对于 02 星,增加程序重载功能。

统计结果表明,故障定位由于单粒子翻转造成的在轨故障有 6 个,占故障总数的 85.7%。分析单粒子翻转故障占比较高的原因为:一方面由于缺乏在轨数据支撑,当含单粒子翻转阈值较低元器件的单机在开关机后能恢复正常工作,且没有找到其他故障原因的,一般认为是单粒子翻转导致故障发生;另一方面,大规模集成元器件的广泛使用,提高了单粒子翻转造成在轨故障的概率。

单粒子翻转来源包括 CPU、DSP、FPGA、RAM 等芯片。RAM 一般用于存储数据,发生单粒子翻转后,会影响相关的数据(如数传下行数据),一般不会影响系统功能。而对于程序存储器,发生单

粒子翻转后,将影响程序运行,可能会导致不可预料后果。

表 2 统计结果和相关文献表明,基于 SRAM 的 FPGA 由于翻转阈值较低、翻转截面较大,容易发生单粒子翻转事件,进而造成在轨故障。下文对典型案例进行分析,并给出相关的防护加固设计对策。

2.2 典型在轨故障案例分析

自某卫星数传综合处理器在轨开机工作以来,地面接收到的数据发生了多次异常现象。该数传综合处理器共有 5 种功能模块,分别为电源模块、压缩模块、控制处理模块、固态存储器控制模块、加扰加密模块。

Xilinx 公司研究结果表明,在地球轨道高度 1 000~11 000 km 之间, FPGA 的单粒子翻转概率较高^[4]。该卫星为太阳同步轨道卫星,轨道高度为 1 200 km 左右,每一圈都要经过南北高纬地区,大部分轨道都经过南大西洋辐射异常带,易受空间异常辐射带的影响。例如,根据数据包中辅助数据包的时间码推算,发生在第 256 圈和第 914 圈的两次异常现象的经纬度分别为 (-36.1°, -13.4°) 和 (-60.0°, -50.0°),位于南大西洋辐射异常带。经过反复的试验验证、FPGA 复查及电路分析,排除了空间温度因素、单机抗干扰能力不足等软硬件故障的可能性,最终问题定位为空间环境适应性不足,即 FPGA 受到空间单粒子效应的影响造成。

该综合处理器共使用 5 片 FPGA,控制处理模块、加扰加密模块、固态存储器控制模块各采用 1 片 300 万门 FPGA 芯片;压缩模块采用 2 片 400 万门 FPGA 芯片。在为期 161 d 的测试期间,各功能模块翻转次数统计如表 3 所示。

表 3 综合处理器各模块翻转统计
Table 3 Statistics of SEUs for different modules of the integrated processor

统计对象	固存控制	RS 组帧	加密加扰	数据压缩	总计
A 机/圈次	13	1	10	3	27
B 机/圈次	5	2	10	1	18
合计/圈次	18	3	20	4	45
平均发生周期/d	161 ÷ 45 = 3.5				

2.3 典型故障的相关处理措施及验证

该数传综合处理器在首发星设计时,由于对其所面临的空间环境认识不足,在设计上有点缺陷:一方面是未考虑不断电的 FPGA 重载措施,当在轨发生空间环境引起的功能异常后,无法带电恢复正常状态,只能通过关机再开机来恢复;另一方面是未考虑单机功能异常断电后前期数据的保存,导致关机再开机后,功能虽然恢复正常,但载荷数据丢失。

2.3.1 在轨预案

按综合处理器中是否有数据来进行开/关机的操作,以降低单粒子翻转产生的影响。具体做法是:在每次数据回放完毕后对综合处理器进行关机,在

首次成像任务前对综合处理器进行开机,同时采取尽早将数据回放完毕的策略。

采取上述措施之前,综合处理器在轨 52 d 的统计时间内,发生翻转 19 次,平均 2.7 d 一次;采取上述措施之后,综合处理器在轨 44 d 的统计时间内,发生翻转 12 次,平均 3.6 d 一次。因此,采用该方案,既确保了 FPGA 每天进行多次重配置,又缩短了单粒子效应的影响时间,减小了单粒子翻转所产生的影响。

2.3.2 后续星的设计修改

对于后续星的研制,综合处理器对存储介质、FPGA 控制芯片以及应对措施等方面进行设计更改,更改方案为:

- 1) 境外工作时,只用反熔丝 FPGA 芯片工作,任务完成后可断电;
- 2) 境内工作时,由于无法避免使用基于 SRAM 的 FPGA,因此在入境前要对这种类型的 FPGA 进行重载,在确保 FPGA 配置信息正确的前提下工作;
- 3) 即使发生单粒子翻转事件,单机可不断电通过指令重载或断电重载,且不丢失已存储的数据,数据仍可正常回放;
- 4) 压缩模块为境外短时间工作时,采用功能自动检测重载或定时重载功能。

3 抗辐射加固设计

为消除或降低单粒子效应带来的影响,本文从硬件和软件两个方面分别给出了工程上应用的措施,供设计工作者参考使用。

3.1 硬件抗辐射加固设计

灵敏体积中沉积的能量才是引起单粒子翻转的最本质因素,因此,翻转截面随沉积能量的变化曲线 ($\sigma \sim \text{LET}$ 曲线) 才真正反映了单粒子翻转的物理本质^[5-6]。重离子产生的单粒子翻转符合 Weibull 函数分布,即

$$\sigma = \sigma_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{E - E_0}{W} \right)^S \right] \right\},$$

其中: σ_0 为饱和翻转截面; E_0 为产生翻转的沉积能量阈值(临界电荷); W 为 Weibull 函数宽度因子; S 为 Weibull 函数形状因子。

根据测试的 $\sigma \sim \text{LET}$ 曲线,可以利用 Weibull 函数进行拟合得到上述参数^[7-8]。采用欧空局 CREME 软

件, 可以计算某款 FPGA 芯片不同饱和翻转截面、不同 LET 阈值的单粒子翻转率, 所得结果如图 1 所示。

从图 1 中可以看出, 单粒子翻转率随芯片饱和翻转截面增大而线性增大, 随芯片翻转阈值增大而呈指数减小。因此, 上天元器件应尽量选用饱和翻转截面较小和翻转阈值较高的芯片。

除元器件选用之外, 硬件抗辐射加固设计还包括资源使用率选取、EDAC (错误检测与修正) 电路设置、冗余设计 (包括单机冗余和三模冗余)、

硬件计数器设置等方法^[9-10], 详见表 4。

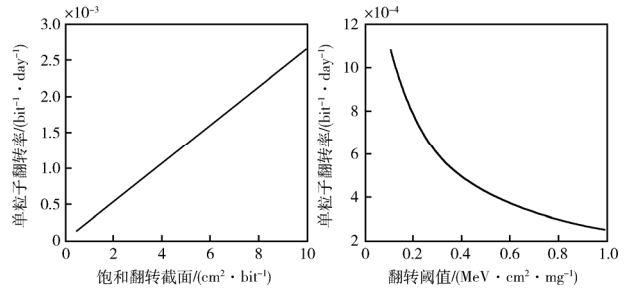


图 1 单粒子翻转率与饱和翻转截面、翻转阈值的关系
Fig. 1 SEU rate against the saturated cross-section and the upset threshold

表 4 硬件抗辐射加固设计方法
Table 4 Methods for hardware radiation hardening

要点	具体加固设计措施
元器件选用	限制使用对总剂量效应和单粒子效应敏感的电子元器件。对于 FPGA, 为减小单粒子翻转发生的概率, 尽量选用反熔丝的 FPGA。
资源利用率选取	大规模集成芯片的翻转率与其总位数和使用率成正比。对同一片芯片, 使用的位数越多 (资源利用率越大), 翻转的概率也越大, 应当降低资源利用率。
EDAC 电路设置	通过软件或硬件电路检测并纠正信息在运算或传输过程中的错误, 如采用奇偶校验、EDAC 电路等。如对存储器辅以 EDAC 电路, 可检出 RAM 的 2 位翻转, 修正 RAM 的 1 位翻转。
冗余设计	采用额外增加并联或备份单元数目的方法, 用额外的硬件和时间两种冗余方式消除故障造成的影响, 增加系统安全系数。可分为工作冗余 (并联和表决系统) 和非工作冗余 (备用系统), 对运算电路、控制电路和中断电路内部存储器采用三冗余系统防止发生软错误。具体冗余硬件有冗余存储器、冗余计算机等。
硬件计数器设置	在软件进入死循环、软件“看门狗”不起作用, 即计数在规定时间内不能被清除时, 则由硬件计数器产生复位信号, 重新启动机器, 从死循环中跳出。
实时监控	采用单粒子不敏感元器件, 如反熔丝 FPGA 对单粒子敏感元器件进行主要性能监控, 发现问题及时进行相关处理。

3.2 软件抗辐射加固设计

软件的抗单粒子翻转容错设计是提高星载计算机可靠性的关键。设计师应严格按功能进行模块

化程序结构设计, 使各模块保持高度的独立性、单向性, 并具有防范非法侵入的自保护措施。可参考的软件抗辐射加固设计方法见表 5。

表 5 软件抗辐射加固设计方法
Table 5 Design methods for software radiation hardening

要点	具体加固设计措施
指令重启	在单机中设计数据处理软件的复位指令, 能够在轨定时或根据工作需要通过外部指令完成软件重载, 具备在开机状态下从单粒子翻转故障状态恢复正常工作的能力。
数据回读	对于大容量 FPGA, 数据处理软件存储于非易失、可靠性高的 PROM 器件, 并通过独立的反熔丝 FPGA 进行监测, 定期完成配置文件回读、校验等工作。一旦发现实时获取的校验数据与存储于 PROM 中的校验数据不符, 则自主完成 PROM 中的程序重载。
三取二表决法	在每个采样周期都把对程序运行有重大影响的标志及对运算结构起关键作用的数据进行三取二比对表决。
段存储器置初值	由中断服务程序执行对段存储器置初值, 若段存储器出现 SEU 使程序出错, 可恢复段存储器的值。
反弹墙设计	对 CPU、PROM、RAM 空闲区全部填充空白指令或其他指定内容。一旦程序跳入空闲区, 就进行跑飞程序处理, 将程序拉回。
软件看门狗设置	当程序按正常路径执行时, 不断清除 WDT。当程序进入死循环时, 如 WDT 在规定的时间内 (如 0.2s) 内不能被清除, 则发出计算机复位信号, 进行初始化处理, 使计算机重新开始运行。

4 总结及工作展望

对航天某院在轨卫星空间辐射环境故障统计结果表明,单粒子翻转是造成在轨故障的主要原因。通过对典型的在轨故障进行分析,同时结合工程实际经验以及仿真分析,提出了卫星硬件和软件抗辐射加固设计方案,所得的结论适用于目前在研和预研卫星型号。

为更有效地提高卫星抗辐射加固设计水平,提高卫星的可靠性,未来需要考虑的还有:

1) 大规模集成芯片集成度高,单粒子翻转阈值越来越低。此外,卫星所选用的空间轨道种类越来越多,环境越来越复杂。因此,需要进一步加强空间环境及单粒子效应的预示和防护工作。

2) 抗辐射设计需要认真落实到产品设计中去,必须提高各级产品设计师的抗辐射设计意识。

3) 目前空间辐射环境的地面试验主要集中在总剂量效应,应加强单粒子效应地面验证试验工作;除单粒子效应外,充放电效应也给卫星可靠运行带来较大隐患,也是需要研究的重点内容。

4) 建立故障诊断和预测管理系统,提高卫星在轨故障发现的时效性和定位准确性。

参考文献 (References)

- [1] 都亨,叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册[M]. 北京:国防工业出版社,1996
- [2] 金恂叔. 航天器在轨故障与空间环境的关系[J]. 航天器环境工程,2004,21(3): 1-6
Jin Xunshu. Space environment and on-orbit failure of spacecrafts[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2004, 21(3): 1-6
- [3] 朱光武,李保权. 空间环境对航天器的影响及其对策研究[J]. 上海航天,2002,19(4): 1-7

- Zhu Guangwu, Li Baoquan. Space environment effect and countermeasure research on spacecraft[J]. Aerospace Shanghai, 2002, 19(4): 1-7
- [4] Yui C, Swift G, Carmichael C. Single-event upset susceptibility of the Xilinx Virtex II FPGA[G] // Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD), 2002
- [5] Petersen E L. The SEU figure of merit and proton upset rate calculations[J]. IEEE Trans Nuclear Science, 1998, 45(6): 2550-2562
- [6] 韩建伟,叶宗海. 质子引发的单粒子翻转率估算的研究[J]. 空间科学学报,1999,19(3): 266-271
Han Jianwei, Ye Zonghai. Prediction of proto-induced single event upset[J]. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(3): 266-271
- [7] 张庆祥,杨兆铭,侯明东. 静态存储器单粒子翻转率预示的在轨验证[J]. 航天器环境工程,2009,26(6): 506-510
Zhang Qingxiang, Yang Zhaoming, Hou Mingdong. Verification of predicted single event upset rate for commercial static random access memory (SRAM)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 506-510
- [8] 贺朝会. 空间轨道单粒子翻转率预估方法研究[J]. 空间科学学报,2001,21(3): 266-273
He Chaohui. Study of methods for predicting SEU rate in space orbits[J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(3): 266-273
- [9] 刘必臻,杨平会,蒋孟虎,等. 航天器单粒子效应的防护研究[J]. 航天器环境工程,2010,27(6): 693-697
Liu Biliu, Yang Pinghui, Jiang Menghu, et al. The protection against single event effects for spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(6): 693-697
- [10] Carmichael C, Fuller E, Blain P, et al. SEU mitigation techniques for Virtex FPGAs in space applications[G] // Military and Aerospace Programmable Logic Devices (MAPLD), 1999

Analyses and countermeasures of in-orbit satellite failures caused by space radiation environment

Zhou Fei, Li Qiang, Xin Tailin, Wei Xifeng, Zhang Hua
(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: The in-orbit satellites' failures caused by space radiation environment are analyzed by statistics. The phenomena and the mechanism of a typical in-orbit SEU failure of an integrated data processor are discussed in detail, with consideration of countermeasures. Based on the analyses of some real cases of in-orbit failures, the engineering experiences and the simulation analyses, this paper proposes methods for radiation hardening through hardware and software approaches, which may help mitigate the SEUs and extend the service life of satellites.

Key words: satellite; single event upset; in-orbit failure; radiation hardening