

环境及其效应

航空电子设备大气辐射环境的危害影响分析

陈宇^{1,2}, 李明^{1,2}, 傅耘^{1,2}

(1. 航空工业综合技术研究所, 北京 100028; 2. 国家质量监督检验检疫总局质量基础设施效能研究重点实验室, 北京 100028)

摘要: **目的** 调查航空电子设备在典型民用飞行高度(8 000~12 000 m)下大气辐射环境的危害影响。**方法** 利用 14 MeV 高能中子源对航空电子设备用 CPU、DSP、FPGA 及存储器开展了辐照试验, 获取了各试件的单粒子效应敏感特性, 采用民航高度下大气中子注量率的典型值 6000 n/(cm²·s), 预计典型航空电子设备在巡航高度下可能发生的软错误率。**结果** 约 900 h 内, 该航空电子设备会由于大气辐射单粒子效应诱发一次错误。**结论** 在不采取针对性防护措施的前提下, 大气中子诱发的单粒子效应将严重影响航空电子设备可靠性、维修性, 甚至危及飞行安全。

关键词: 航空电子设备; 大气辐射; 中子; 中子诱发的单粒子效应; 软错误率

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.020

中图分类号: V216 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0109-04

Hazard Effects of Atmospheric Radiation Environment on Avionics

CHEN Yu^{1,2}, LI Ming^{1,2}, FU Yun^{1,2}

(1. AVIC China Aero-polytechnonlogy Establishment, Beijing 100028, China; 2. Key Laboratory of Quality Infrastructure Efficacy Research, AQSIQ, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the hazard effects of atmospheric radiation environment on avionics at typical civil flight altitudes (8 000 m to 12 000 m). **Methods** The 14 MeV high-energy neutron source was used to conduct irradiation tests on CPU, DSP, FPGA and memory for avionics. The single event effect sensitivity of each test piece was obtained. The typical value (6000 n/(cm²·s)) of the atmospheric neutron flux at the altitude of civil aviation was adopted to estimate the single event effect rate of typical avionics at cruising altitude. **Results** The avionics would cause a single particle effect of atmospheric radiation within about 900 hours. **Conclusion** Under the premise of not taking targeted protective measures, the single event effect induced by atmospheric neutrons will seriously affect the reliability and maintainability of avionics and even endanger flight safety.

KEY WORDS: avionics; atmospheric radiation; neutron; neutron induced single event effect; soft error rate

飞机必然会遭遇大气中子、质子等次级粒子组成的辐射环境, 大气中子穿透能力强, 会穿透飞机的蒙皮和机箱, 从而射入航空电子设备内部, 诱发 CPU、DSP、FPGA 及存储器等器件发生 SEE(单粒子效应)。SEE 包括单粒子翻转(SEU)、多位翻转(MBU)、单粒子瞬态(SET)、单粒子功能中止(SEFI)、单粒子栅穿(SEGR)及单粒子烧毁(SER)等。器件发生

SEE 后, 可能会进一步导致航空电子设备出现数据错误、数据丢失、自动复位、功能异常、功能丧失、死机、甚至电路烧毁等软、硬故障。随着深亚微米级器件在航空电子设备中的广泛应用, 大气中子诱发的单粒子效应已经成为航空电子设备故障的主要原因之一, 原本只有航天领域重视的单粒子效应及其危害研究, 现在乃至未来, 在航空领域也已越来越受到重视。

在美国联邦航空局 (FAA)、美国国防部 (DoD)、美国国家航空与航天局 (NASA) 等机构的引导下, 对于大气辐射环境探测及建模、中子诱发 SEE 机理、满足适航要求的 SEE 防护要求及防护技术等方面已开展了广泛研究与探索^[1-4]。考虑到航空电子设备出货量较大, 对成本控制和功耗要求非常严格, 且航空高度器件发生 SEE 的类型主要是 SEU、MBU、SET、SEFI 等, 其诱发航空设备故障类型主要是软错误。军工和航天领域采用的器件级工艺加固方法不适用于航空电子设备的 SEE 防护设计, 系统级软错误减缓技术为其首选^[5]。在系统级采取 SEE 减缓措施之前, 必须要清楚器件在航空高度下的 SEE 敏感特性, 以便权衡用于 SEE 减缓用的资源和速度的开销成本。文中针对航空电子设备用 CPU、DSP、FPGA 及存储器等 SEE 敏感器件, 开展了 14 MeV 高能中子辐照试验, 基于试验数据, 预计了典型航空电子设备在巡航高度下的软错误率。

1 受试件

1.1 受试器件

针对某航空电子设备中的 SEE 敏感器件开展试验, 受试件的选择及其信息见表 1。

表 1 受试件信息

类型	型号	工艺	工作电压/V	厂家
CPU	PC 7448	CMOS/Si 90 nm	内核: I/O: 2.5	Freescale
DSP	TMS320C2812	CMOS/Si 90 nm	内核: 1.2I/O: 3.3	TI
FPGA	Virtex-4 XC4VLX60	CMOS/Si 90 nm	内核: 1.2I/O: 3.3	Xilinx
SRAM	GVT71128G36	CMOS/Si 0.25 μm	3.3	Galvan-tech

1.2 测试的 SEE 敏感区

各受试件的测试区及容量大小见表 2。

表 2 各器件的测试区域

型号	测试的 SEE 敏感区	容量/bit
PC 7448	通用寄存器	32×32=1 024
	浮点寄存器	32×64=2 048
	特殊功能寄存器	8×32=256
	虚拟寄存器	16×32=512
	状态寄存器	16×32=512
	矢量运算寄存器	32×128=4 096
	高速缓存 L1	262 144
TMS320C6418	程序 Cache L1P	128 k×1=131 072
	数据 Cache L1D	128 k×1=131 072
	未定义的 Cache	4 M×1=4 194 304
XC4VLX60	CLB	17 675 264
	BRAM	17 675 264
GVT71128G36	存储区	128 k×36

2 试验方法

试验按照 JEDEC DESD89A 标准^[6]进行, 试验用的辐射源为氘-氘中子发生器, 中子能量为 14 MeV。试验期间, 中子注量率的范围控制在 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ 之间。在辐照期间, 各试验件均在室温下暴露于中子束, 中子束平行芯片法向方向入射。

1) PC 7448 工作电压加载额定值, 内核为 1 V, I/O 口为 2.5 V, 测试类型为静态, 测试模式执行棋盘算法。试验件通过 JTAG 口与 freescale powerpc 仿真器相连接, 仿真器通过 USB 接口连接上位机电脑。上位机利用 CodeWarrior for PowerPC 软件中的 CPU 及周边寄存器、存储器、变量及堆栈等窗口, 实时查看试验过程中受中子辐照影响而修改的数据, 实现翻转数的统计。

2) TMS320C6418 工作电压加载额定值, 内核为 1.2 V, I/O 口为 3.3 V, 测试类型为静态, 测试模式执行棋盘算法。试验件通过 JTAG 口与 TI DSP USB 仿真器相连接, 仿真器通过 USB 接口连接到上位机电脑。上位机利用 CCS (Code Composer Studio) 软件查看 CPU 寄存器及 Cache, 实时查看试验过程中受中子辐照影响而修改的数据, 实现翻转数的统计。

3) XC4VLX60 工作电压加载额定值, 内核为 1.2 V, I/O 口为 3.3 V, 测试类型为静态。试验件通过 Xilinx Parallel IV 配置电缆进行配置, 该电缆连接到运行 Xilinx IMPACT 软件的上位机电脑。IMPACT 在每次辐照前配置器件, 在辐射后再次检验配置数据, 统计检测到的错误数量。每次验证期间, 自动保存器件的配置比特流, 以便在试验后进行更深入的分析。

4) GVT71128G36 型 SRAM 工作电压加载额定值, 工作电压为 3.3 V, 测试类型为静态, 测试模式执行棋盘算法。试验件与 TMS320C6418 DSP 相连接, 通过 TMS320C6418 DSP 对 GVT71128G36 型 SRA 进行读写操作, 查看试验过程中 GVT71128G36 型 SRAM 受中子辐照影响而修改的数据, 实现翻转数的统计。

3 试验数据及分析

3.1 试验数据

试验原始数据见表 3。

表 3 单粒子效应试验数据

型号	被测试的总容量/bit	中子注量 / cm^{-2}	翻转数/个
PC 7448	270 592	3.35×10^{10}	106
TMS320C6418	4 456 448	1.57×10^8	104
XC4VLX60	17 675 264	5.98×10^8	183
GVT71128G36	4 718 592	1.31×10^9	210

3.2 单粒子翻转截面计算

单粒子翻转敏感截面计算如式 (1) 和式 (2) 所示:

$$\sigma_{\text{bit}} = \frac{N}{F \times n_{\text{bit}}} \quad (1)$$

式中: σ_{bit} 为每存储位 (bit) 的单粒子翻转截面值, cm^2/bit ; N 为翻转数; F 为试验中子总注量, cm^{-2} ; n_{bit} 为受试 bit 总数。

$$\sigma_{\text{device}} = \frac{N}{F} \quad (2)$$

式中: σ_{device} 为器件单粒子翻转截面值, $\text{cm}^2/\text{device}$ 。

根据式 (1) 和 (2), 计算得出 4 种被试件的单粒子效应截面, 见表 4。

表 4 单粒子效应试验数据

型号	$\sigma_{\text{bit}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1})$	$\sigma_{\text{device}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{device}^{-1})$
PC 7448	1.17×10^{-14}	3.17×10^{-9}
TMS320C6418	1.49×10^{-13}	6.64×10^{-7}
XC4VLX60	1.73×10^{-14}	3.06×10^{-7}
GVT71128G36	3.39×10^{-14}	1.60×10^{-7}

3.3 软错误率预计

航空电子设备大气中子诱发的软错误数跟入射的中子数量、选用器件单粒子效应敏感特性以及器件

级单粒子效应至设备级故障的传递率等因素息息相关。计算公式见式 (3), 其入射的中子注量率取决于飞行高度、经纬度以及太阳活动情况。文中采用 IEC62396 大气辐射影响系列标准^[7]的推荐值: 在纬度 45° 、高度 12 000 m 处, 大气中子典型值为 $6000 /(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。

$$R_{\text{SER}} = \sum_{i=1}^n \sigma_{\text{device-}i} \times R_{\text{FLUX}} \times A \quad (3)$$

式中: R_{SER} 为航空电子设备的软错误率; i 为选用的器件系列编号; n 为器件总数; σ_{device} 为第 i 个器件的单粒子翻转饱和截面; R_{FLUX} 为大气中子注量率; A 为器件级单粒子效应至设备级故障的传递率。

该航空电子设备在飞行高度下发生软错误率的预计结果见表 5。目前, A 的取值还没有建立严谨的数据模型, 工程上较能接受的经验值为 $0.1^{[8-10]}$, 即器件发生 10 个位翻转, 在系统级层面会输出 1 个错误。文献^[11]研究表明, 对于深亚微米级器件 14 MeV 试验获得的翻转截面已接近器件的饱和截面, 故文中采用的饱和截面为 14 MeV 中子辐照试验所获得的数值。计算结果表明, A 取值为 0.1 时, 该航空电子设备约 900 h 内会发生 1 次错误。如果该设备为航空 A 类安全设备, 不采取针对性 SEE 减缓措施的情况下, 远不能满足适航安全要求^[12]错误率小于 1×10^{-9} 次/h 的指标。

表 5 典型飞行高度下的航空电子设备软错误率预计

型号	$\sigma/(\text{cm}^2 \cdot \text{device}^{-1})$	使用个数	$\sum \sigma$	R_{FLUX}	A	R_{SER}
PC 7448	3.17×10^{-9}	1	1.92×10^{-6}	6000	0.1	1.15×10^{-2}
TMS320C6418	6.64×10^{-7}	1				1.15×10^{-3}
XC4VLX60	3.06×10^{-7}	2				1.15×10^{-4}
GVT71128G36	1.60×10^{-7}	4				

4 结论

通过对航空用典型器件开展高能中子辐照试验, 并基于试验数据, 预计航空电子设备在飞行高度下的软错误率。与适航安全要求对比分析可以得出: 采用深亚微米级器件的航空电子设备受大气辐射环境影响严重, 在不采取针对性防护措施的前提下, 将不能满足适航的相关要求。由于文中采用的是器件级静态 SEE 数据, 该数据至设备级故障率传递关系过程简单, 预计结果偏保守, 器件级至设备级的严谨数学传递关系尚未建立, 还有待基于设备级动态对比试验进一步研究探索。

参考文献:

[1] GORDON M S, GOLDHAGEN P, ROBBELL K P, et al.

Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-ray Induced Neutrons on the Ground[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51(6): 3427-3434.

[2] BAGGIO J, LAMBERT D, FERLET-CAVROIS V, et al. Single Event Upsets Induced by 1~10 MeV Neutrons in Static-RAMs Using Mono-Energetic Neutron Sources[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54(6): 2149-2155.

[3] BAUMANN R. Soft Errors in Advanced Computer Systems[J]. IEEE Design and Tests of Computers, 2005, 58(8): 305-316.

[4] KRETZSCHMAR U, ASTARLOA A, JIMÉNEZ J, et al. Compact and Fast Fault Injection System for Robustness Measurements on SRAM-based FPGAs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 1044-1050.

[5] DU B Y, STERPONE L. Fault Tolerant Electronic System Design[C]// 2017 IEEE International Test Conference (ITC). Fort Worth, TX, USA, 2017.

[6] JEDEC JESD89A, Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors

- in Semiconductor Devices[S].
- [7] IEC TS-62396-1, Process Management for Avionics—Atmospheric Radiation Effects—Part 1: Accommodation of Atmospheric Radiation Effects Via Single Event Effects Within Avionics Electronic Equipment[S].
- [8] NORMAND E, BAKER T J. Altitude and Latitude Variations in Avionics SEU and Atmospheric Neutron Flux[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(5): 426-451.
- [9] NGUYEN H T, YAGIL Y. A Systematic Approach to SER Estimation and Solutions[C]// Proc of the 41st Annual Intl Reliability Physical Symp Dallas. Texas, 2003.
- [10] HANG T. Nguyen, Chip-Level Soft Error Estimation Method[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2005, 5(3): 356-381.
- [11] MILLER F, WEULERSSE C, CARRIÈRE T, et al. Investigation of 14 MeV Neutron Capabilities for SEU Hardness Evaluation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2789-2796.
- [12] SAE ARP4761, Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment[S].