

数字信号处理大气中子单粒子效应(SEE) 试验研究

闫飞*, 闫攀峰

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 本文针对 4 型航空常用的数字信号处理 (DSP) 进行了大气中子单粒子效应试验, 对辐照条件、试验环境、试验件安装及监测方法进行研究, 并对试验结果进行了数据处理及分析。试验结果表明, 该 4 型 DSP 在 14MeV 中子辐射下均发生了单粒子翻转 (SEU 是单粒子效应中的一种模式), TMS320C6416TBGLZA8、TMS320C6418ZTSA500、TMS320F2812 及 SM32C6415E-GLZ50SEP 的单粒子翻转截面分别为 $1.91\text{e-}7\text{cm}^2/\text{device}$ 、 $6.62\text{e-}7\text{cm}^2/\text{device}$ 、 $8.82\text{e-}9\text{cm}^2/\text{device}$ 及 $1.62\text{e-}7\text{cm}^2/\text{device}$, 在 12000m 处的飞行高度下, 器件发生的单位翻转率分别为 $1.15\text{e-}03\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$ 、 $3.97\text{e-}03\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$ 、 $5.29\text{e-}05\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$ 、及 $9.69\text{e-}04\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$ 。

关键词: 数字信号处理; 单粒子翻转; 截面; 单粒子翻转率; 大气中子

中图分类号: V21 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.053

大气中子是初级宇宙射线与地球大气中的氧、氮等发生核反应生成的次级粒子。在 12000m 高度下, 大气中子的能量可高达 1000MeV, 注量率为地面中子注量率的 300 倍左右^[1]。大气中子单粒子效应对数字信号处理 (DSP) 的影响已经成为国内外研究热点, 据国外大量研究表明, DSP 内部存储单元在高中子作用下会发生单粒子效应, 如单粒子翻转、单粒子功能中止等。美国联邦航空局 (FAA) 于 2005 年发布咨询通告 AC 20-152, 要求专用集成电路 (ASIC)、可编程逻辑器件 (PLD)、现场可编程门阵列 (FPGA) 等复杂电子器件应符合 DO-254 中第 2.3.1.2.h 条款, 条款中提出在硬件设计中对翻转效应进行防护^[2]。

近年来, 我国航空事业得到蓬勃发展, 为进一步提高民用航空电子设备的可靠性及安全性, 国内已开始关注大气中子单粒子效应的防护。为指导民用航空电子设备大气中子单粒子效应防护设计工作, 迫切需要开展航空复杂电子器件的中子单粒子效应试验研究。本文为国内首次针对 DSP 器件开展的大气中子单粒子效应地面验证试验^[3]。

1 试验样品

1.1 受试器件

受试器件为 TI 公司生产的 TMS320X 系列及 SM32C64X 系列 DSP, 所选器件在进行中子单粒子效应试验之前, 已通过规定的相关试验和电性能测试。受试器件详细信息见表 1。

表 1 受试器件
Table 1 Test device

器件型号	生产厂家	工作电压	器件工艺	特征尺寸
TMS320C6416TBGLZA8	TI	I/O : 3.3V 内核: 1.2V	CMOS	90
TMS320C6418ZTSA500	TI	I/O : 3.3V 内核: 1.2V	CMOS	130
TMS320F2812	TI	I/O : 3.3V 内核: 1.8/1.9V	CMOS	130
TM32C6415EGLZ50SEP	TI	I/O : 3.3V 内核: 1.25V	CMOS	130

收稿日期: 2018-04-28; 退修日期: 2018-07-14; 录用日期: 2018-07-26

* 通信作者: Tel.: 13363903534 E-mail: 375387694@qq.com

引用格式: Yan Fei, Yan Panfeng. Study of atmospheric neutron single event effects experiment of DSP [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (08): 53-57. 闫飞, 闫攀峰. 数字信号处理大气中子单粒子效应 (SEE) 试验研究 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (08): 53-57.

1.2 受试 DSP 单粒子效应敏感单元

(1)TMS320F2812 型 DSP

该器件对大气中子单粒子效应敏感的存储单元包括 288K bit 的单通道随机存储器 (SARAM),内部存储单元详见表 2^[4]。

表 2 TMS320F2812 内部存储器结构
Table 2 Internal memory structure of TMS320F2812

器件型号	存储单元	容量 /bit	总存储量
TMS320F2812	L0	4K × 16SARAM	288K
	L1	4K × 16SARAM	
	H0	8K × 16SARAM	
	M0	1K × 16SARAM	
	M1	1K × 16SARAM	

(2) TMS320C6418ZTSA500 型 DSP

该器件对大气中子单粒子效应敏感的存储单元包括 128K bit 程序存储器 (LIP)、128K bit 数据存储器 (LID)、4M bit 统一映射存储器 / 缓存 (L2), 内部存储单元详见表 3^[5]。

表 3 TMS320C6418ZTSA500 内部存储器结构
Table 3 Internal memory structure of TMS320C6418ZTSA500

器件型号	存储单元	容量 /bit	总存储量 /bit
TMS320C6418 ZTSA500	LIP	128K Program Cache	4352K
	LID	128K Data Cache	
	L2	4M unified mapped RAM/Cache	

(3) TMS320C6416 型与 SM320C6415 型 DSP

对大气中子单粒子效应敏感的存储单元包括 128K bit 程序存储器 (LIP)、128K bit 数据存储器 (LID)、8M bit 统一映射存储器 / 缓存 (L2), 内部存储单元详见表 4^[6,7]。

表 4 TMS320C6416 及 SM320C6415 内部存储器结构
Table 4 Internal memory structure of TMS320C6416 and SM320C6415

器件型号	存储单元	容量 /bit	总存储量 / bit
TMS320C6416	LIP	128K Program Cache	8448K
	LID	128K Data Cache	
	L2	8M unified mapped RAM/Cache	
SM320C6415	LIP	128K Program Cache	8448K
	LID	128K Data Cache	
	L2	8M unified mapped RAM/Cache	

2 试验设计

2.1 标准大气条件

温度: 15~35℃; 相对湿度: 20%~80%; 气压: 标准环境大气压 (约 760mm 汞柱)。

2.2 试验辐照条件

(1) 辐射源: 高压倍加器产生的 14MeV 中子。(2) 辐照不均匀性: 试验件中敏感器件接受到中子辐照不均匀性 ≤ ±10%。(3) 注量率: 10²~10⁶n/(cm²·s)。(4) 注量: 使被试件接受的平均中子注量达到 10⁹n/cm² 或达到 100 个单粒子翻转后可中止辐照。(5) 屏蔽: 辐照源与试验件之间使用 4mm 铝板进行屏蔽。(6) 工作状态: 受试器件试验期间保持静止, 辐照前后, 记录数据状态的改变。(7) 摆放: (a) 受试器件的平均垂直于受试器件的中心与靶心的连线; (b) 受试器件的中心位置距离中子源至少 80cm。

2.3 试验装置

试验装置详见表 5。

表 5 中子单粒子效应试验主要试验设备清单
Table 5 Neutron single event effect test main equipment list

序号	设备名称	主要功能	计量有效期	设备位置
1	高压倍加器	产生 14MeV 中子	非标设备, 无计量证书, 测量误差符合国家重点实验室规定	辐照间
2	中子注量率监测仪	注量率监测误差 1% 左右	—	辐照间
3	电源	供电	应满足要求	测试间 / 屏蔽室

2.4 器件监测条件

通过仿真器回读 DSP 中的内部存储单元, 测试系统原理图如图 1 所示, 回读数据与辐照前的回读数据相比较, 统计翻转的比特数。

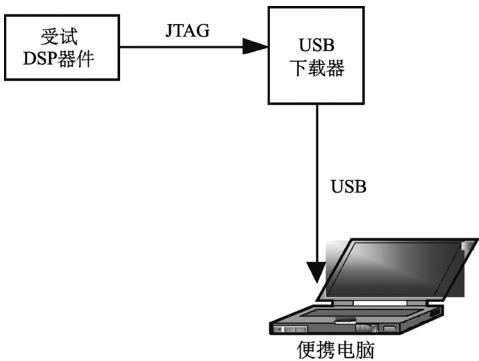


图 1 DSP 单粒子翻转测试原理图
Fig.1 DSP SEU test schematic

中子辐射中被监测的对象见表 6。

表 6 DSP 大气中子单粒子效应监测表

Table 6 DSP atmospheric neutron single event effect monitoring table

器件	监测单元	容量/bit	总存储量/bit	现象
TMS320F2812	L0	4K × 16SARAM	288K	SEU
	L1	4K × 16SARAM		
	H0	8K × 16SARAM		
	M0	1K × 16SARAM		
	M1	1K × 16SARAM		
TMS320C6418ZTSA500	LIP	128K Program Cache	4352K	SEU
	LID	128K Data Cache		
	L2	4M unified mapped RAM/Cache		
TMS320C6416TBGLZA8	LIP	128K Program Cache	8448K	SEU
	LID	128K Data Cache		
	L2	8M unified mapped RAM/Cache		
SM32C6415EGLZ50SEP	LIP	128K Program Cache	8448K	SEU
	LID	128K Data Cache		
	L2	8M unified mapped RAM/Cache		

3 试验实施

3.1 试验件的安装

试验系统主要由 14MeV 中子辐照源、中子注量率监测仪、屏蔽板、受试 DSP、电源、导线、及测试机台等组成，试验系统布局如图 2 所示。

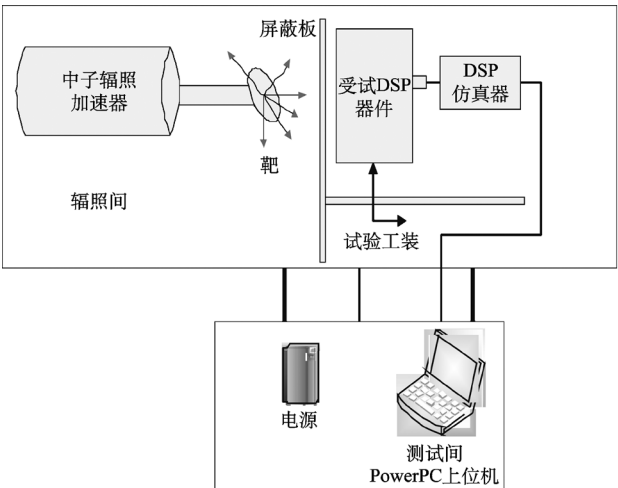


图 2 中子单粒子效应试验主要设备布局示意图
Fig.2 Neutron single event effects test schematic layout of major equipment

3.2 试验流程图

中子辐照前,对受试器件进行配置并回读,保存回读数据作为参照数据,在辐照期间,受试器件保持静态状态,辐照后读出受试单元的数据,与参照数据相比较,统计翻转次数。试验流程如图 3 所示。

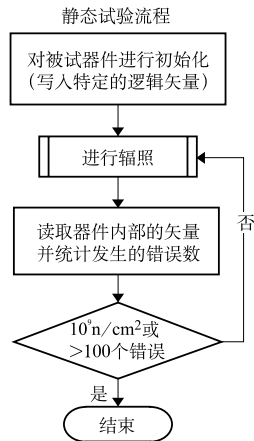


图 3 中子单粒子效应试验流程图
Fig.3 Neutron single event effect test flow chart

(1) 写入配置文件,对器件进行配置;(2) 回读并保存回读文件;(3) 记录工作电压和功耗电流;(4) 开始辐照;(5) 辐照至一定注量后,暂停;(6) 记录工作电压和功耗电流;(7) 回读并与辐照前回读文件比较统计发生翻转数;(8) 当翻转数达到 100 个时停止辐照,如果没有 100 个翻转,则重复 (4) ~ (7) 步骤直到注量达到 10^9n/cm^2 时停止辐照;(9) 通过加载、回读,确定电流及回读功能正常。

4 试验数据及分析

4.1 试验数据

试验原始数据见表 7。

表 7 DSP 器件试验数据
Table 7 DSP device test data

序号	DSP 器件部件	平均注量率 / (n/ (cm ² · s))	总注量 / (n/cm ²)	翻转数
1	TMS3206416TBGLZA8	4.16×10^4	9.850×10^5	188
2	TMS3206418ZTSAS00	1.78×10^5	1.567×10^8	104
3	TMS320F2812	1.136×10^5	1.022×10^9	9
4	SM32C6415EGLZ50SEP	7.914×10^4	7.123×10^8	115

4 型 DSP 单粒子翻转数随中子辐射注量变化如图 4~图 7 所示,从图可以看出,单粒子翻转数随中子辐射注量呈现为线性关系,表明试验所选用的中子辐射注量率的大小合理,试验数据科学可靠。

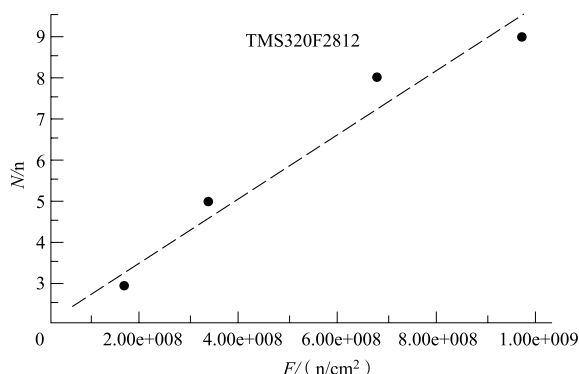


图4 TMS320F2812 翻转数随注量率变化图

Fig.4 TMS320F2812 single event upset rate change chart

TMS320C6418 型 DSP 中子单粒子效应翻转数随注量变化如图 5 所示。

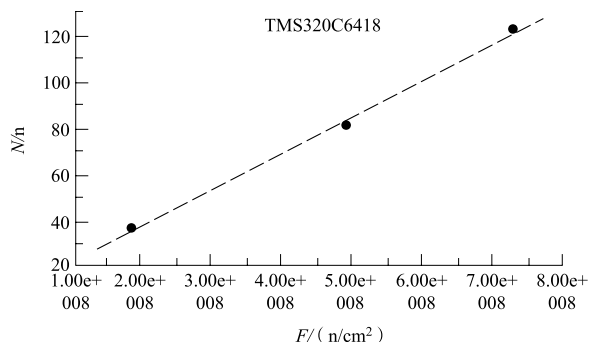


图5 TMS320C6418 翻转数随注量率变化图

Fig.5 TMS320C6418 single event upset rate change chart

TMS320C6416 型 DSP 中子单粒子效应翻转数随注量变化如图 6 所示。

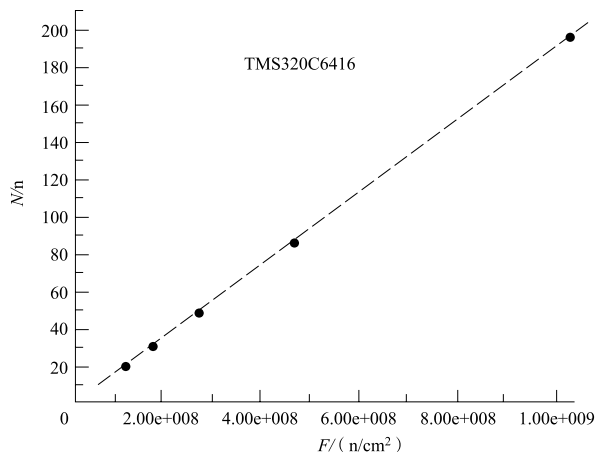


图6 TMS320C6416 翻转数随注量率变化图

Fig.6 TMS320C6416 single event upset rate change chart

SM320C6415 型 DSP 中子单粒子效应翻转数随注量变化如图 7 所示。

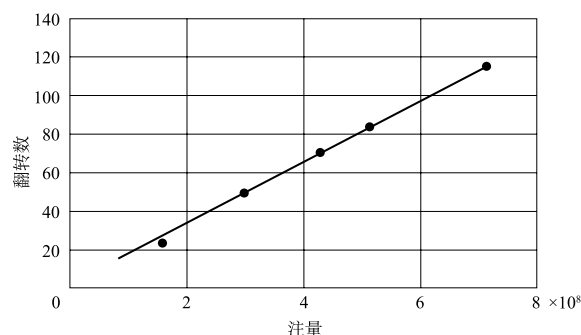


图7 SM320C6415 翻转数随注量率变化图

Fig.7 SM320C6415 single event upset rate change chart

4.2 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:

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

式中: σ_{bit} 为每存储位 (bit) 的单粒子翻转截面值, 单位 cm^2/bit ; N 为翻转数; F 为试验中子总注量, 单位 n/cm^2 ; $\text{bit}_{\text{total}}$ 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, 单位 $\text{cm}^2/\text{device}$ 。

根据式 (1) 和式 (2), 计算得出 4 种型号 DSP 器件的单粒子效应敏感截面值, 见表 8。

表8 DSP 器件敏感截面值

Table 8 Sensitive cross-sectional value of the DSP device

序号	型号	N	$F/(\text{n}/\text{cm}^2)$	$\text{bit}_{\text{total}}$	$\sigma_{\text{bit}}/(\text{cm}^2/\text{bit})$	$\sigma_{\text{device}}/(\text{cm}^2/\text{device})$
1	TMS320C6416TBGLZA8	188	$9.85\text{e}-08$	8448K	$2.21\text{e}-14$	$1.91\text{e}-7$
2	TMS320C6418ZTSAS00	104	$1.57\text{e}-08$	4352K	$1.49\text{e}-13$	$6.62\text{e}-7$
3	TMS320F2812	9	$1.02\text{e}-09$	288K	$2.99\text{e}-14$	$8.82\text{e}-9$
4	SM32C6415EGLZ50SEP	115	$7.12\text{e}-08$	8448K	$1.87\text{e}-14$	$1.62\text{e}-7$

4.3 单粒子翻转率计算

航空复杂电子器件任务期间所遭受的大气中子注量率视任务飞行高度、维度情况而定。在 12000m 飞行高度上, 器件遭受的大气中子国际典型值为 $6000\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, DSP 器件大气中子单粒子翻转率如式 (3) 所示:

$$\text{SEE}_{\text{rate-device}} = \frac{\text{FLUX} \times \sigma_{\text{device}} \times A}{3600} \quad (3)$$

式中: $\text{SEE}_{\text{rate-device}}$ 为器件单粒子效应翻转率, 单位 $\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$; FLUX 为典型工作环境下的中子注量, 本次取值 $6000\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$; A 为加权系数, 取值与器件特征尺寸相关, 一般情况建议, 特征尺寸 $\leq 90\text{nm}$, 取值为 1; 特征尺寸为 $90\sim 130\text{nm}$ 之间, 取值为 1.5; 特征尺寸大于 130nm 的工艺器件, A 取值为 2。见表 9。

表 9 DSP 器件单粒子翻转率
Table 9 DSP device SEU rate

序号	型号	FLUX/ (n/(cm ² ·h))	σ / (cm ² /bit)	SEE _{rate-device} / (n/(device·h))
1	TMS320C6416TBGLZA8	6000	2.21e-14	1.15e-03
2	TMS320C6418ZTSA500	6000	1.49e-13	3.97e-03
3	TMS320F2812	6000	2.99e-14	5.29e-05
4	SM32C6415EGLZ50SEP	6000	1.87e-14	9.69e-04

5 结论

国外大量研究表明，DSP 器件是一种大气中子单粒子效应敏感器件，这种器件广泛使用在复杂航空电子设备中。为了验证及掌握该类器件的大气中子单粒子效应失效机制，填补国内 DSP 器件大气中子单粒子效应试验空白，本文设计了一套地面模拟试验，包括试验样品敏感架构分析、试验设计、试验实施和试验数据及分析等。

本文通过 DSP 器件中子单粒子效应试验结果进行数据分析，计算器件敏感截面及对模拟真实飞行条件的器件失效率预估可以看出，DSP 器件是大气中子单粒子效应敏感器件，带存储单元的功能模块会发生单粒子翻转（SEU）等中子单粒子效应。

AST

参考文献

[1] IEC/TS 62396 PART1-2006 Process management for avionics

accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment[S]. 2006.

[2] RTCA DO-254 Design assurance guidance for airborne electronic hardware[S]. RTCA, Washington, DC, 2000.
[3] IEC/TS-62396 Part2 Guidelines for single event effects testing for avionics systems Process management for avionics[S]. 2008.
[4] TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 Digital signal processors data manual[Z].Texas Instrument, 2011.
[5] TMS320C6418 Fixed-point digital signal processor data manual[Z].Texas Instrument, 2005.
[6] TMS320C6414T, TMS320C6415T, TMS320C6416T Fixed-point digital signal processor[Z].Texas Instrument, 2006.
[7] SM320C6414-EP, SM320C6415-EP, SM320C6416-EP Fixed-point digital signal processor [Z].Texas Instrument, 2008.

作者简介

闫飞（1984—）女，学士，工程师。主要研究方向：军用/民用飞机安全性分析技术。

Tel: 13363903534

E-mail: 375387694@qq.com

闫攀峰（1981—）男，学士，高级工程师。主要研究方向：可靠性设计与分析。

Study of Atmospheric Neutron Single Event Effects Experiment of DSP

Yan Fei *, Yan Panfeng

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In this paper, the testing method of Single Event Effects (SEE) experiment to 4 types of commonly used DSP was studied, including the radiation condition, experiment environment, equipment install and monitoring methods, etc. The database of the experiment was also data processed and analyzed. The experiment result is that TMS320C6416TBGLZA8 DSP SEU cross-section is $1.91e-7\text{cm}^2/\text{device}$, at 12000m altitude, SEU rate is $1.15e-03\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$; TMS320C6418ZTSA500 DSP SEU cross-section is $6.62e-7\text{cm}^2/\text{device}$, at 12000m altitude, SEU rate is $3.97e-03\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$; TMS320F2812 DSP SEU cross-section is $8.82e-9\text{cm}^2/\text{device}$, at 12000m altitude, SEU rate is $5.29e-05\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$; SM32C6415EGLZ50SEP DSP SEU cross-section is $1.62e-7\text{cm}^2/\text{device}$, at 12000m altitude, SEU rate is $9.69e-4\text{n}/(\text{device} \cdot \text{h})$.

Key Words: DSP; SEU; cross section; SEU rate; atmospheric neutron

Received: 2018-04-28; Revised: 2018-07-14; Accepted: 2018-07-26

*Corresponding author.Tel.: 13363903534 E-mail: 375387694@qq.com