0254-6124/2018/38(4)-502–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Zhangang, LEI Zhifeng, SHI Qian, YUE Long, HUANG Yun, EN Yunfei. Neutron radiation environment and resulting single event effects prediction in near space (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(4): 502-507. DOI:10.11728/cjss2018.04.502

临近空间中子辐射环境分析及其引起的单粒子效应预计研究 *

张战刚 雷志锋 师 谦
岳 龙 黄 云 恩云飞

(工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室 广州 510610)

摘 要 使用 Space Radiation 7.0 工具分析临近空间中子辐射环境, 研究其与海拔高度、太阳活动和经纬度的关系及内在原因. 在此基础上, 提出了一种基于蒙特卡罗方法的大气中子实时错误率预计方法, 并以航空电子系统关键集成电路 FPGA 为例, 预计其单粒子翻转敏感模块包括配置存储器、块存储器和用户触发器, 单粒子功能中断敏感模块包括上电复位电路、SelectMAP 接口等的实时飞行错误率. 结果表明, 配置存储器中发生的单粒子翻转达到总单粒子翻转率的 77%, 而上电复位电路和 SelectMAP 接口中发生的单粒子功能中断各占总单粒子功能中断率的 36%. 根据 RTCA DO-254 对飞行系统失效等级的划分, 该 FPGA 器件不可用于航空电子系统关键位置.

关键词 临近空间, 中子, 单粒子效应, 场可编程门电路

中图分类号 P 353

Neutron Radiation Environment and Resulting Single Event Effects Prediction in Near Space

ZHANG Zhangang LEI Zhifeng SHI Qian

YUE Long HUANG Yun EN Yunfei

(*Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou* 510610)

Abstract Neutron radiation environment in near space is analyzed by Space Radiation 7.0 toolkit. It is found that neutron flux decreases by several orders as altitude increases, low-energy neutron flux increases sharply at solar maximum condition, neutron flux increases constantly as latitude ascends. The inner reasons are further investigated. Based on the results, a prediction technique of atmospheric-neutron induced Real-Time Soft Error Rate (RTSER) using Monte-Carlo method is proposed. Taking Field Programmable Gate Array (FPGA), critical Integrated Circuit (IC) used

* 国家自然科学基金项目 (11505033), 广东省省级科技计划项目 (2015B090901048, 2017B090901068, 2015B090912002) 和广州市科技计划项目 (201707010186) 共同资助
2017-06-22 收到原稿, 2018-01-10 收到修定稿
E-mail: zhangangzhang@163.com

in avionics system, as an example, the RTSERs of Single Event Upset (SEU) sensitive modules (including Configurable Memory (CM), Block Random Access Memory (BRAM) and user Flip-Flops (FF)) and Single Event Functional Interrupt (SEFI) sensitive modules (including Power-On-Reset (POR), SelectMAP *etc.*) are predicted. The results show that SEUs in CM accounted for 77% of the total SEU rate in the FPGA. Both POR and SelectMAP SEFIs accounted for 36% of the total SEFI rate respectively. According to the failure levels of flight system in RTCA DO-254, the FPGA can not be employed in key positions of avionics.

Key words Near space, Neutron, Single event effect, FPGA

0 引言

临近空间是距地面 20~100 km 所包含的空域, 包括大气平流层区域 (距地面 18~55 km)、大气中间层区域 (距地面 55~85 km) 和小部分增温层区域 (距地面 85~800 km), 纵跨非电离层和电离层 (60 km 以下为非电离层, 60~1000 km 为电离层), 其绝大部分成分为均质大气 (90 km 以下的大气)[1]. 近年来, 临近空间的战略价值逐渐引起各国的重视, 在加强对临近空间进行全面探测的同时, 临近空间飞行器也因其显著特点和潜在的军、民用价值而成为研究热点 [2,3].

临近空间存在由大量辐射粒子组成的复杂辐射环境, 这些辐射粒子主要由空间中存在的银河宇宙射线和太阳抛射的太阳宇宙射线进入地球的中性大气, 并与中性大气中的 N 和 O 发生交互作用而形成, 主要包括中子、质子、电子、γ 射线、π 介子、μ 介子等. 由于中子不带电、穿透能力极强且大气含量高, 临近空间中子入射航空电子系统引起的单粒子效应 (Single Event Effects, SEE) 成为威胁飞行器安全工作的关键潜在因素 [4]. 国际上 1956 年就开始大气中子辐射环境的探测 [5,6] 和单粒子效应研究, IBM、波音、Xilinx 等机构已开展了大量相关研究, 包括飞行实测、地面加速器和裂变堆模拟试验与评价、仿真研究等, 形成了一系列行业规范和标准, 如 JESD89A[7], RTCA DO-254 等. 中国在临近空间中子研究方面起步较晚, 目前仍没有合适的地面加速器模拟设备, 这给电子器件临近空间中子单粒子效应评价带来困难. 此外, 临近空间中子辐射环境数据也存在一定的空白.

这里使用最新版本的 Space Radiation 7.0 工具*, 基于 Avionics/SE 模型开展临近空间大气中子辐射环境分析, 研究大气中子谱特点及其与海拔高度、太阳活动和经纬度的关系. 在此基础上, 以航空电子系统关键集成电路场可编程门电路 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 为例, 预计其各个敏感模块在临近空间的中子单粒子效应错误率, 评价其在临近空间应用的风险等级.

1 中子辐射环境分析

1.1 与海拔高度关系

图 1 以北京地区 (海拔: 40°N, 116°E) 为例, 给出了距地面 20~100 km 空域的中子通量–能量谱. 由图 1 可见: 临近空间中子能量范围广, 高达 100 GeV 的量级; 中子通量总体上随能量的增高而递减, 通量横跨三个数量级, 在几 MeV 能量附近有一个非递减区; 临近空间中子通量随海拔高度增大而减小数倍, 这源于大气密度的减小.

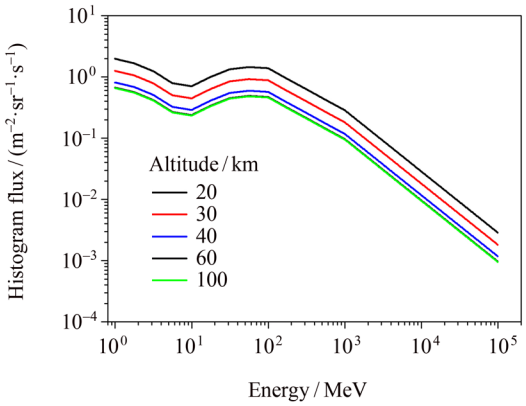


图 1 北京地区上空临近空间中子谱随海拔高度的变化

Fig. 1 Neutron spectrums in near space above Beijing region at various altitudes

*http://www.spacerad.com/, Space Radiation Associates, 2018

1.2 与太阳活动关系

图 2 以北京地区上空 50 km 海拔高度为例, 给出了太阳极小年和极大年的中子通量–能量谱. 由图 2 可以看出: 在能量低于十几 GeV 的范围, 太阳极大年的中子通量高于太阳极小年, 增大量最高超过三个数量级; 而在能量高于十几 GeV 的范围, 太阳极大年的中子通量低于太阳极小年. 太阳极大年时, 太阳耀斑事件产生大量的低能质子, 导致临近空间低能中子通量急剧增大; 同时由于受太阳活动的调制, 太阳极大年时银河宇宙射线通量降低, 引起高能质子通量降低, 从而导致临近空间高能中子通量降低.

1.3 与经纬度关系

图 3 给出了海拔高度 50 km, 116°E 经度处北半球的中子通量–能量谱. 由图 3 可以看出, 赤道地区的中子通量最低, 随着纬度的升高, 中子通量持续增大数倍. 该现象源于纬度越高, 地磁截止刚度越大.

图 4 给出了海拔高度 50 km, 40°N 纬度处东经地区的中子通量–能量谱. 由图 4 可见, 相比于纬度, 经度对临近空间中子谱的影响较小.

2 单粒子效应预计

FPGA 是航空电子系统的关键集成电路. FPGA 的大气中子单粒子效应主要有单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU), 单粒子功能中断 (Single Event Functional Interrupt, SEFI), 单粒子锁定 (Single Event Latchup, SEL) 等.

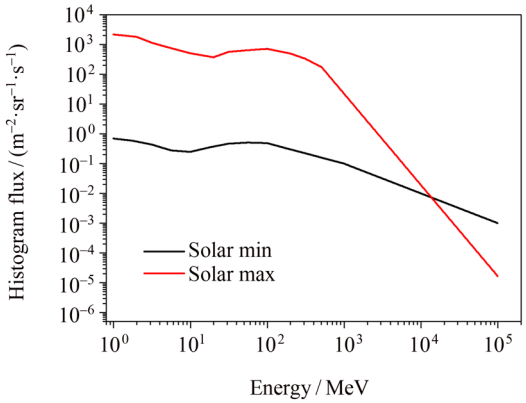


图 2 太阳极小年与极大年北京地区上空 50 km 处大气中子谱

Fig. 2 Neutron spectrums at 50 km above Beijing region during solar min. and solar max

这里以 Xilinx 公司 Virtex-4 系列 SRAM 型 FPGA 为研究对象 (器件型号: XQR4VSX55), 预计其在北京市上空 20 km 处、太阳极小年的飞行 SEU 率和 SEFI 率. 该器件使用 90 nm CMOS 工艺, SEU 敏感模块包括配置存储器、块存储器和用户触发器, SEFI 敏感模块包括上电复位电路 (Power On Reset, POR)、SelectMAP 接口、帧地址寄存器 (Frame Address Register, FAR)、全局信号寄存器等.

2.1 预计方法

表 1 给出了该 FPGA 器件各个敏感模块重离子试验数据的 Weibull 曲线拟合参数及容量 [8]. 结合 Weibull 参数和应用环境的中子谱, 通过粒子输运仿真计算得到飞行错误率. 使用实际大气环境下的实

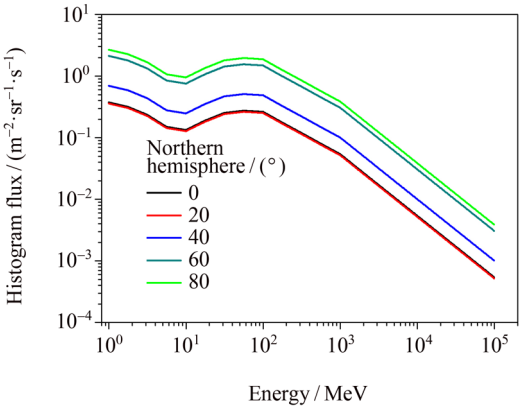


图 3 50 km 海拔高度、116°E 经度处北半球的中子通量–能量谱

Fig. 3 Neutron spectrums at 50 km, 116°E across the northern hemisphere

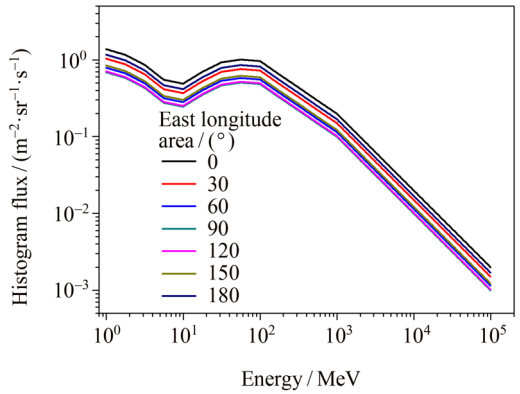


图 4 50 km 海拔高度、40°N 纬度处东经地区的中子通量–能量谱

Fig. 4 Neutron spectrums at 50 km, 40°N across the east longitude areas

表 1　90 nm FPGA 器件各模块 Weibull 参数及容量

Table 1　Weibull parameters of sensitive modules of the 90 nm FPGA and corresponding capacities

	效应类型	饱和截面	LET 阈值/ (MeV·cm^2·mg^{-1})	W 参数/ (MeV·cm^2·mg^{-1})	S 参数	容量/bit	占比/(%)
SEU	配置存储器	2.60×10^{-7} cm^2·bit^{-1}	0.5	400	0.98	1.54×10^{7}	72.1
	块存储器	3.50×10^{-8} cm^2·bit^{-1}	0.2	70	0.72	5.90×10^{6}	27.6
	用户触发器 (1)	7.50×10^{-7} cm^2·bit^{-1}	0.5	400	0.92	4.92×10^{4}	0.2
	用户触发器 (0)	6.10×10^{-7} cm^2·bit^{-1}	1.5	400	0.92	–	–
SEFI	POR	6.27×10^{-6} cm^2	0.2	150	1.17	10	–
	SMAP	5.52×10^{-5} cm^2	0.2	1200	1.17	100	–
	FAR	8.91×10^{-7} cm^2	0.2	35	1.13	1	–
	全局信号寄存器	2.01×10^{-6} cm^2	0.2	400	0.94	4	–

时测量试验对预计方法可信性进行验证. 具体步骤如下.

步骤 1　获取应用环境的大气中子谱.

步骤 2　建立三维器件模型, 如图 5 所示. 表层金属布线结构获取：可通过制造工艺或反向分析获得各层金属布线和介质层厚度、材料成份等, 建立真实模型或简化使用二氧化硅层替代. 灵敏区参数获取: 通过地面重离子加速器辐照试验获得, 主要参数包括灵敏区的长度 x、宽度 y、厚度 z 和临界电荷 $Q_{\rm c}$; 地面重离子加速器辐照试验结果为多个单粒子效应截面 σ 与离子 LET 值 (定义符号 L) 数据点. 对数据点进行 Weibull 拟合, 得到饱和截面 $\sigma_{\rm sat}$, LET 阈值 $L_{\rm th}$, W 和 S 共 4 个参数. Weibull 拟合公式为

$$\sigma(L)=\sigma_{\rm sat}\left\{1-\exp\{-[(L-L_{\rm th})/W]^S\}\right\}. \tag{1}$$

根据饱和截面和 LET 阈值, 可得灵敏区的长度、宽度和临界电荷:

$$x=y=\sqrt{\sigma_{\rm sat}}, \tag{2}$$

$$Q_{\rm c}=\frac{L_{\rm th}\rho_{\rm si}z}{22.5}. \tag{3}$$

式中, $\rho_{\rm Si}$ 为硅材料密度 (232 mg·cm^{-3}), z 的单位为 cm, $Q_{\rm c}$ 的单位为 pC. 灵敏区厚度一般根据器件结构进行选取, 设置为耗尽区的厚度或阱深. 衬底/埋氧层: 可通过制造工艺或反向分析获得.

步骤 3　中子输运仿真计算. 结合步骤 1 和 2, 使用中子输运仿真工具 (Geant4, MCNP 等) 计算大气中子在三维器件模型中产生的核反应产物以及核反应产物在灵敏区中的沉积能量分布.

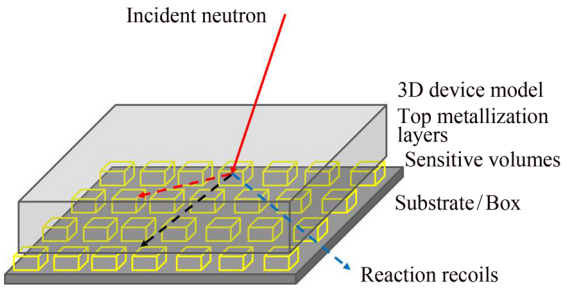


图 5　预计流程

Fig. 5　Schematic diagram of the prediction processes

步骤 4　实时错误率预计. 结合步骤 2 和 3, 当核反应产物在灵敏区中的沉积能量大于临界电荷时, 计作一次单粒子效应; 结合步骤 1 的大气中子谱和步骤 3 的沉积能量大于临界电荷的核反应产物产生概率, 得到大气中子实时错误率, 即单粒子效应率.

2.2　飞行 SEU 率

表 2 为该 90 nm FPGA 器件在北京地区上空 20 km 处的飞行 SEU 率. 预计得到的总 SEU 率为 7.00×10^{-4}h^{-1}, 其中配置存储器所占比例最大, 约达到总 SEU 率的 77%, 用户触发器所占比例很小.

2.3　飞行 SEFI 率

表 3 为该 90 nm FPGA 器件在北京地区上空 20 km 处的飞行 SEFI 率. 预计得到的总 SEFI 率为 4.13×10^{-9}h^{-1}, 其中 POR SEFI 和 SMAP SEFI 所占比例最大, 各约占总 SEFI 率的 36%, 全局信号 SEFI 所占比例很小.

3 危害等级评价

一般使用 FIT 值和平均无故障工作时间 (Mean Time Between Failure, MTBF) 对实时飞行错误率进行表征. 1 FIT 相当于 10^9 小时内发生一个错误, MTBF 为实时飞行错误率的倒数.

表 2 90 nm FPGA 器件在北京地区上空 20 km 处的飞行 SEU 率

Table 2 Flight SEU rate of 90 nm FPGA at 20 km above Beijing

敏感模块	飞行 SEU 率	
	$(\text{bit}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$(\text{device}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$
配置存储器	3.49×10^{-11}	5.37×10^{-4}
块存储器	2.67×10^{-11}	1.57×10^{-4}
用户触发器 (1)	1.16×10^{-10}	2.85×10^{-6}
用户触发器 (0)	8.77×10^{-11}	2.16×10^{-6}
SEU 率总计	–	7.00×10^{-4}

表 3 90 nm FPGA 器件在北京地区上空 20 km 处的飞行 SEFI 率

Table 3 Flight SEFI rate of 90 nm FPGA at 20 km above Beijing

敏感模块	飞行 SEFI 率/h^{-1}
POR	1.57×10^{-9}
SMAP	1.50×10^{-9}
FAR	7.52×10^{-10}
全局信号	3.10×10^{-10}
SEFI 率总计	4.13×10^{-9}

该 90 nm CMOS SRAM 型 FPGA 在北京市上空 20 km 处的实时飞行 SEU 率为 7.00×10^5 FIT, MTBF 约为 60 天; 实时飞行 SEFI 率为 4.13 FIT, MTBF 约为 2.76×10^4 年.

根据 RTCA DO-254 飞行系统失效等级的划分, 其抗 SEU 能力仅符合 D 级要求, 抗 SEFI 能力仅符合 B 级要求, 不可用于航空电子系统关键位置.

4 结论

临近空间中子辐射环境数据及其引起的单粒子效应风险评估方法是开发临近空间资源、保障临近空间飞行器电子系统可靠性的重要手段. 本文基于 Space Radiation 7.0 工具开展海拔 20~100 km 临近空间中子通量–能量谱分析, 发现中子通量随海拔高度的增加而减小约 3 倍, 低能段中子通量在太阳极大年急剧增大, 中子通量随纬度的升高持续增大, 并对其内在原因进行了研究.

在此基础上, 提出了一种基于蒙特卡罗方法的大气中子实时错误率预计方法, 并以航空电子系统关键集成电路 FPGA 为例, 预计其单粒子翻转敏感模块包括配置存储器、块存储器和用户触发器, 单粒子功能中断敏感模块包括 POR, SMAP, FAR 和全局信号寄存器的实时飞行错误率. 结果表明, 其在北京市上空 20 km 处的实时飞行中子单粒子翻转率为 $7.00\times$

表 4 DO-254 飞行系统失效等级

Table 4 Flight system failure levels of DO-254

等级	失效的影响	失效情况	概率	
			等级	FIT
A	毁灭性	妨碍持续安全飞行和着陆	极度不可能	<1
B	危险/极度严重	大大降低安全余量或功能性, 物理危险或更高的工作负荷, 导致机组人员不能准确或完全地执行任务, 或对乘客不利, 包括对少数乘客产生严重或潜在的致命伤害	极度少	$<10^2$
C	严重	显著降低安全余量或功能性, 显著增大机组人员工作量或降低机组人员效率, 或使乘客不适, 包括可能的伤害	少	$<10^4$
D	较小	安全余量或功能性的轻微降低, 轻微增大机组人员工作量, 如飞行路线计划更改, 或对乘客造成一些不便	可能	$<10^6$
E	无影响	不影响飞机操作性或增大机组人员工作量	–	–

10^5 FIT, MTBF 约为 60 天; 单粒子功能中断率为 4.13 FIT, MTBF 约为 2.76×10^4 年. 其中, 配置存储器中发生的单粒子翻转达到总单粒子翻转率的 77%, 而上电复位电路和 SelectMAP 接口中发生的单粒子功能中断各占总单粒子功能中断率的 36%. 根据 RTCA DO-254 对飞行系统失效等级的划分, 该器件不可用于航空电子系统关键位置.

参考文献

[1] ZHANG Zhenli. A simulation study of near space atmospheric neutron and its single event effects to electronic device [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010 (张振力. 临近空间大气中子及其诱发的单粒子效应仿真研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010)

[2] LIANG Baichuan. Research of EW of near space [J]. *Aeros. Elec. Warf.*, 2009, **25**(4): 15-17 (梁百川. 临近空间电子对抗研究 [J]. 航天电子对抗, 2009, **25**(4): 15-17)

[3] CAO Xiuyun. Aircraft in near space becomes the recent research focus of countries [J]. *Chin. Aeros.*, 2006, (6): 32-35 (曹秀云. 近空间飞行器成为各国近期研究的热点 (上) [J]. 中国航天, 2006, (6): 32-35)

[4] ZHANG Zhenli, ZHANG Zhenlong, HAN Jianwei, *et al.* Simulation study on single event upset induced by near space atmospheric neutron in electronic devices [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 350-354 (张振力, 张振龙, 韩建伟等. 临近空间大气中子诱发电子器件单粒子翻转模拟研究 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(3): 350-354)

[5] HESS W N, CANFIELD E H, LINGENFELTER R E. Cosmic-ray neutron demography [J]. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**(3): 665-677

[6] HESS W N, PATTERSON H W, WALLACE R, *et al.* Cosmic-ray neutron energy spectrum [J]. *Phys. Rev.*, 1959, **116**(2): 445-457

[7] JEDEC Board. JESD89A standard: measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor device. Arlington: JEDEC Solid Stste Technology Association, 2006

[8] ALLEN G, SWIFT G, CARMICHAEL C, *et al.* Virtex-4QV static SEU characterization summary[EB/OL]. [2018-01-10]. http://parts.jpl.nasa.gov/

会 讯

第 12 届亚洲微重力科学会议将于今年 11 月在珠海举行

第 12 届亚洲微重力科学会议 (12th Asian Microgravity Symposium, AMS 2018) 将于 2018 年 11 月 12−16 日在中国珠海举行, 会议由中国空间科学学会微重力科学与应用专业委员会 (NSMSA/CSSR) 与空间生命科学专业委员会 (NSSLS/CSSR) 以及日本微重力应用学会 (JASMA)、日本空间生物科学学会 (JSBSS)、韩国微重力学会 (KMS) 等联合主办, 中国科学院微重力重点实验室、中山大学空间技术中心等单位承办. 亚洲微重力科学会议是在中–日微重力科学研讨会基础上, 经中–日–韩微重力科学会议逐步扩大发展而成的亚洲微重力科学与空间生命科学等相关领域学术交流的一个顶级平台. 本届会议主题包括微重力流体物理、微重力燃烧、空间材料科学、空间基础物理、空间生命科学与生物技术、微重力实验技术与平台设施等. 会议将安排大会邀请报告、主旨报告、口头报告与墙报展示等, 充分展示近年来亚洲和国际微重力科学与空间生命科学等相关领域的最新成果. 会上交流的优秀报告还将基于专家意见推荐至 Microgravity Science and Technology (SCI 源刊)、International Journal of Microgravity Science and Application (日本微重力应用学会会刊, 现已被 ESCI 收录, 全部论文均可开放索取) 和《空间科学学报》等学术期刊发表. 欢迎海内外相关研究领域的科技工作者及研究生积极投稿, 踊跃参会.

会议网站: http://ams.csp.escience.cn/