



第一届中国卫星导航学术年会 论文集

(上)

中国卫星导航学术年会组委会

CSNC 2010

China Satellite Navigation Conference 2010

CSNC2010

第一届中国卫星导航学术年会

论文集

上册

目 录

专题一 北斗系统政策、法规和标准/卫星导航系统工程与项目管理/系统安全与防护

- ◆ 辐射易敏 SRAM 型 FPGA 在导航卫星中的适用性实验研究 周永彬 邢克飞 王跃科 张传胜 (1)
- ◆ 卫星导航系统监测站覆盖性能分析及布设方法初步研究 李作虎 郝全明 李建文 赵齐乐 张成军 (8)
- ◆ GNSS 抗干扰方法研究 罗显志 王 垚 张志新 邓志鑫 (17)
- ◆ GPS 完好性监测发展现状与展望 边 朗 张立新 张 伟 蒙艳松 (23)
- ◆ 北斗二代卫星导航系统星地一体化运行管控系统架构研究 李菊芳 龙运军 陈英武 姚 锋 (31)
- ◆ 北斗全球导航系统 (COMPASS) 标准国际化的一点思考 秦 智 (39)
- ◆ 北斗卫星导航系统增值服务与运管探讨 刘 咏 王 鑫 (47)
- ◆ 基于模型可移植性规范的导航系统性能仿真研究 侯洪涛 周鸿伟 张 洪 李 群 (53)

专题二 用户终端与天线技术

- ◆ 基于同态滤波的 GPS 空时自适应处理补偿技术 吴仁彪 徐如兰 卢 丹 (63)
- ◆ 运动条件下的天线阵 SMI 算法性能分析 曾祥华 李 敏 聂俊伟 王飞雪 (70)
- ◆ 北斗用户机抗干扰低暴露技术研究 李 琳 杨 生 谭述森 (78)
- ◆ 基于码多普勒补偿的微弱 GNSS 长码快速直接捕获算法 李 洪 周 辉 陆明泉 冯振明 (87)
- ◆ GPS 接收机窄带干扰抑制方法研究 庄学彬 陆明泉 崔晓伟 冯振明 (97)
- ◆ 矢量延迟锁定环码跟踪偏差产生机理研究 肖志斌 唐小妹 鹿 晶 王飞雪 (106)

◆ BOC 调制的带限复信号采样技术	刘瀛翔 唐小妹 张 错 王飞雪 (114)
◆ CAPS 导航天线分析与设计	鹿 峰 施洪立 柯树人 孙希廷 王晓岚 (120)
◆ CGTR 中的伪卫星信号接收机	王 超 张 楠 谢 松 (126)
◆ GNSS 软件接收机设计与实现	戎 强 邢兆栋 王 颖 (132)
◆ GPS 半无码跟踪技术仿真与性能分析	黄 静 姚 铮 陆明泉 (140)
◆ GPS 接收机空时抗干扰技术研究	司东晓 蔚保国 邢兆栋 邢志鑫 (148)
◆ GPS 软件接收机基带信号自适应跟踪方法	刘 冬 程俊仁 (157)
◆ INS 辅助 GPS 接收机跟踪环算法研究	刘范伊 赵 昀 耿生群 (165)
◆ 导航接收机中基带算法的定点仿真、优化与实现	马天翔 崔晓伟 陆明泉 冯振明 (171)
◆ 导航星座基带记录仪的设计与实现	陈 培 王 盛 韩 潮 (178)
◆ 多径环境下天线性能对 GPS 载波信号的影响	张勇虎 周 力 欧 钢 (186)
◆ 非理想特性通道对 MEDLL 多径检测虚警的影响研究	张 错 刘荃莘 唐小妹 王飞雪 (190)
◆ 国产双频测地型 GPS 接收机的实现及其性能	王永泉 张文强 孙国良 (196)
◆ 基于 GNSS 信号极化特性的多路径分析	孙希廷 纪元法 鹿 峰 (202)
◆ 基于天线阵的 GPS 抗干扰模块设计与实现	庄学彬 崔晓伟 陆明泉 尹旭明 冯振明 (208)
◆ 基于周期重复 CLEAN 的 GPS 抗干扰算法	卢 丹 吴仁彪 王 磊 胡铁乔 孙宇宁 (216)
◆ 基于子空间技术的常规多波束形成抗干扰算法	王 磊 (225)
◆ 军民兼容卫导终端中 FPGA 的有效位长截取和滤波抽取	鹿春雷 卢艳娥 严玉国 袁火平 (231)
◆ 模块化动态可重组多模导航信号捕获算法的实现	宗竹林 何 春 陆永彩 (240)
◆ 卫星导航定位多径信号极化状态分析	孙 莉 周 力 李柏渝 欧 钢 (248)
◆ 卫星导航联合空时抗干扰接收机量化问题研究	郭 艺 沈 菲 陈 兵 (254)
◆ 卫星导航系统自适应抗干扰软件研发平台	吴仁彪 文贵宏 刘海涛 (264)
◆ 一种基于 MLBT 的变换域窄带干扰抑制技术	黄国胜 黎族华 易争荣 帅 涛 朱振才 (271)

- ◆ 一种基于概略 PVT 信息的多普勒频率偏移估计算法 王梦丽 陈金平 (279)
- ◆ 一种基于扩展 MUSIC 算法的导向矢量估计算法 李 敏 聂俊伟 曾祥华 王飞雪 (286)
- ◆ 一种改进的高动态平方根卡尔曼载波跟踪环路 邓中亮 杨 磊 邹德君 (295)
- ◆ 一种同步信号辅助的自适应波束形成方法及试验结果分析
..... 王 炎 曹秀英 吴 博 (302)
- ◆ 一种统一的空域空时天线阵抗干扰性能评估方法 聂俊伟 曾祥华 李 敏 王飞雪 (308)
- ◆ 一种微惯性/软件接收机超紧组合方案研究
..... 高 鹏 闫立伟 富 立 王玲玲 郭志英 (316)
- ◆ 一种延长弱信号环境下载波环平均周跳时间的方法 王建辉 牟卫华 欧 钢 (324)
- ◆ 一种用于 BOC(1,1)信号的无模糊跟踪方法 周艳玲 胡修林 唐祖平 刘禹圻 张祥莉 (331)

专题三 导航信号体制与算法

- ◆ 我国全球卫星导航信号设计研究 谭述森 周 兵 郭盛桃 刘志检 (337)
- ◆ COMPASS 导航信号性能评估研究 唐祖平 周鸿伟 胡修林 冉一航 刘禹圻 周艳玲 (344)
- ◆ 带限 GPS 接收机伪码测距性能分析 刘 婧 崔晓伟 陆明泉 (357)
- ◆ 码相关参考波形技术在 BOC 信号接收中的多径抑制性能研究
..... 刘荃萃 倪少杰 张 锴 王飞雪 (369)
- ◆ 正交复用 BOC 调制及其多路复合技术 姚 铮 陆明泉 冯振明 (382)
- ◆ BPSK-R 信号与 BOC 信号码跟踪性能分析及比较
..... 何在民 胡永辉 武建锋 马红皎 王继刚 王 康 (389)
- ◆ GPS 接收机软件调度方法与性能分析及测试
..... 郭 瑞 罗 兵 唐康华 何晓峰 罗 勇 (397)
- ◆ DS/FH 测控信号的多普勒频率跟踪性能仿真分析
..... 孟生云 杨文革 陈 竹 路伟涛 刘 佳 (404)
- ◆ Galileo L1 OS 信号捕获算法改进 高 扬 (409)
- ◆ Galileo 系统 E5 频带 AltBOC 与 QPSK 调制比较 秦长路 吕 晶 李仰志 (417)
- ◆ GPS L2C CL 码捕获算法研究 孙 亮 崔晓伟 沈 军 陆明泉 (425)

◆ 导航卫星多路信号恒包络调制技术研究	王 鹏 刘崇华 韩治刚 董海青 (437)
◆ 导航卫星功放线性化的预失真算法研究	程 成 胡泽鑫 梁旭文 (448)
◆ 基于 FIR 抽取滤波器和 FFT 的 GPS 信号捕获算法	王 伟 陈 培 方宝东 池忠明 (454)
◆ 结合 LDPC 信道编码的卫星导航信号体制研究	刘祖军 易克初 田 斌 田红心 (460)
◆ 卫星导航电文设计分析	陈金平 王梦丽 李保东 (466)
◆ 卫星导航信号抗单频干扰性能研究	刘禹圻 胡修林 唐祖平 冉一航 周艳玲 (473)
◆ 卫星导航信号系统间干扰性能的评估与分析	张建军 卢晓春 袁 洪 (484)
◆ 现代化的 GNSS 扩频码分析	张天桥 陆明泉 (496)
◆ 新型军用 M 码信号捕获算法	李成军 陆明泉 冯振明 (506)
◆ 新一代 GPS 卫星抗干扰性能分析	梁高波 陈元友 谢云鹏 (516)
◆ 一种新的 BOC 调制无模糊跟踪鉴别器设计	唐 斌 郭盛桃 刘 富 (525)
◆ 中高轨卫星星座的链路研究	周 远 朱 俊 文捷兰 廖 瑛 (531)

辐射易敏 SRAM 型 FPGA 在导航卫星中的适用性实验研究

周永彬 邢克飞 王跃科 张传胜

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙, 410073)

摘要: 利用兰州重离子加速器进行了百万门 SRAM 型 FPGA 的单粒子效应实验研究。给出了实验方法、实验流程、实验系统的设计方案以及获得的实验结果。通过实验获得了该器件配置存储器和片内 Block RAM 的重离子翻转截面; 对三模冗余(TMR)、动态刷新等容错机制的有效性进行了实验验证, 结合导航任务特点, 对 SRAM 型 FPGA 的适用性进行分析。

关键词: 导航卫星; 单粒子效应; 辐射可靠性; SRAM 型 FPGA; 设计加固

Suitability of using radiation susceptible SRAM based FPGAs in navigation satellites: an experimental study

Zhou Yongbin, Xing Kefei, Wang Yueke, Zhang Chuansheng

(School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Heavy ion test results carried out by Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL) of Xilinx XC2V1000 SRAM based FPGA are present. Test method, test setup and results analysis are given. Heavy ion upset cross section of XC2V1000's configuration memory and BlockRAM are calculated. A Triple-Module Redundancy (TMR) hardened circuit has been tested in the FPGA in two manners, i.e. without and with scrubbing the configuration memory. Moreover, the suitability of using such radiation susceptible devices on navigation satellites are studied.

Key words: navigation satellites; single event effects; radiation reliability; SRAM based FPGA; radiation hardening by design (RHBD)

1 引言

高性能商用现货 FPGA 是提高星载信号处理平台性能的“利器”, 在国内外的航天器上都有广泛采用。但是, 由于这类器件对空间辐射环境诱发的单粒子效应非常敏感, 具有较低的翻转阈值(通常 $LET_{th} < 2\text{MeV}/\text{cm}^2/\text{mg}$) 和较大的翻转截面(100 万门 SRAM 型 FPGA 饱和翻转截面约为 0.1cm^2)^[1,2], 其在卫星上的应用将势必带来严重的辐射环境可靠性风险。鉴于导航系统对精度、连续性、可用性、完好性的要求同样迫切, 缺一不可, 在系统设计时是否采用此类器件成为了一个两难问题。本文从导航关键应用角度出发, 对此类器件采取和未采取辐射加固措施前后的单粒子效应敏感性展开了实验研究, 对其在导航卫星中的适用性进行了分析评估。

2 实验环境

2.1 被测器件

被测器件(DUT, Device Under Test)是目前应用较为广泛的 Xilinx 公司 Virtex-II 系列 FPGA XC2V1000。该器件具有 100 万等效数字门, 内核电压为 1.5V, 由 150nm 8 层铜 CMOS 工艺制成。XC2V1000 具有 1280 个可配置逻辑块(CLB)、10240 个触发器、40 个 18K 位 BlockRAM、40 个专用乘法器、8 个数字时钟管理器以及为数众多的可编程输入输出和连接矩阵等片上资源。

实验用器件为未经辐射加固工艺的工业级器件。选择原因是该器件所在的工业级生产线与军品级生产线在抗辐射能力上的差异并不大,与宇航级器件的差异也主要体现在总剂量和抗闩锁能力上^[2]。且其特征尺寸(深亚微米)在当代信号处理器件中有一定的代表意义。由于重离子在封装材料中的射程有限,实验前需要采用化学蚀刻方法将晶圆外部的封装材料去除,即器件“开帽”,开帽后的晶圆在电子显微镜下可以清晰的看到芯片内的各种金属连接线和电路单元。

2.2 仪器设备

开展高能粒子束流实验需要准备的设备或仪器见表 1。其中,高能粒子源是开展单粒子效应实验最为关键的设备。一般有以下几种:重离子加速器、质子加速器、²⁵²Cf 源、14MeV 中子源等。根据国内现有设备的条件,本次试验选择兰州重离子加速器(HIRFL)作为高能粒子源。

表 1 束流实验仪器设备

设备/仪器	功 能
高能粒子源	提供高能重离子
束流终端系统	束流均匀化、能量衰减,提供重离子注量、能量监测功能
自动测试系统	DUT 控制,SEU、软失效自动检测,结果统计与报告
电源及程控继电器	为 DUT 及所在电路板提供远程供断电能力
电视监控设备	为 DUT 设备状态提供远程监视能力

2.3 实验装置

实验在 HIRFL 专门用于材料辐照特性研究的束流线终端上进行,束流终端和待测电路板见图 1。

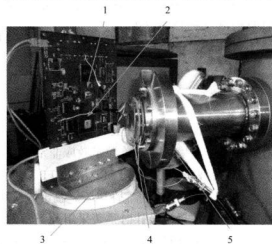


图 1 HIRFL 重离子束流终端与被测电路板

1. 被测 DSP; 2. 被测 FPGA; 3. 三自由度固定平台; 4. 镍窗; 5. 束流终端

本次实验中 HIRFL 提供的离子束流为 ⁸⁶Kr, Kr 离子是进行半导体集成电路单粒子效应实验的一种常用离子。离子束流经过逐级加速和真空输运线到达真空靶室的能量为 2150MeV。靶室内部放置了三明治二次电子探测器用来进行注量监测。此外,由于 HIRFL 提供的束流能量较高,在靶室内还准备了 Al 降能片对离子能量进行衰减。

为了更换被测器件和调整电路板角度方便,被测电路板没有放置在真空靶室内部,而是通过镍窗将束流引出到真空室外,在空气中完成辐照实验。为了保证能量盈余,选择较高的离子能量。在 SEU 实验时,束流垂直入射到被测器件上;而为了提高 LET 值,在 SEL 实验时,插入了降能片

并且调整了电路板倾斜角度,使离子以 60 度倾角入射。两种实验条件下,离子在空气中传输距离经测量分别为 55mm 和 83mm。利用 SRIM2006 程序进行分析计算,本次实验中到达器件表面的离子能量与 LET 值等参数在表 2 中给出。

表 2 束流参数

实验类别	离子能量(MeV)	有效 LET 值(MeV·cm ² /mg)	射程 (Si) (μm)
SEU	1493	23.57	207.5
SEL	318	80.14	40.6

3 SRAM型FPGA的实验方法

待测 FPGA 安装在一块专用的测试电路板上,通过板上串行口和 JTAG 接口与服务端计算机相连。以上设备均放置在辐照室内。客户端计算机放置在测试室内,利用 100M 以太网口同辐照室内的计算机进行数据交互。

对 FPGA 的静态实验按照敏感单元的类型分为两个部分:配置存储器内容的单粒子翻转和 BlockRAM 内容的单粒子翻转。动态条件下,对 TMR 设计加固电路进行了不结合和结合动态擦洗机制两种条件下的顽健性(Robustness)测试。另外还利用本次实验具有较高的离子 LET 值这一条件,对该芯片的抗单粒子门锁能力进行了实验。

3.1 配置存储器单粒子翻转

对配置存储器的翻转测试采用了 JTAG 回读方法。利用 Xilinx ISE 开发工具生成一个 4 位计数器电路的配置位流,并将下载电缆配置为网络工作模式。利用配置管理软件 (impact) 从控制室内的客户端计算机对 FPGA 进行配置。开始实验后,通过 JTAG 接口间隔一段时间对其内容进行回读校验,记录回读时刻以及错误数量。

3.2 Block RAM 单粒子翻转

对发生 Block RAM 中的翻转不能采用 JTAG 回读方法进行校验,而是利用 SelectMAP 接口进行 BRAM 帧的动态回读校验。在实验前,FPGA 内部下载非常简单的配置文件,该文件没有对 BlockRAM 进行任何操作。从配置位流中可以看出其 BRAM 帧内容全部为 0。实验时,选取 XC2V1000 配置存储器中总共 220 帧 BRAM 内容中的 30 帧分为三组,每组含 10 帧,每组容量为 33920bit。利用 Actel FPGA 中专门编写的 Virtex-II 配置存储器回读程序对三组 BRAM 内容每隔 10 分钟循环回读一次,将回读结果通过串口发送到服务端计算机。服务端计算机对结果进行比对,并将错误数据通过以太网口报告到控制室内的计算机。

3.3 TMR 抗单粒子翻转能力实验

将 FPGA 功能设计成中频直接序列扩频信号解扩功能,并对该解扩功能模块进行三模冗余容错加固。该设计占用了 XC2V1000 全部逻辑资源的约 30%。三个解扩模块共用相同输入数据。如果表决器能够从三组输出中判断出正确结果,即两个以上的输出是一致的,则代表 TMR 功能正常;反之,若两个以上的输出存在差异,则 TMR 将无法判断究竟正确结果是多少,这时就代表 TMR 功能因单粒子效应而出现失效了。当 TMR 失效时,通过 JTAG 端口对其进行重新配置,一旦重新配置后 TMR 仍然不能输出正确信号,则可以认为在配置存储器中发生了持续性故障^[3]。

3.4 单粒子门锁实验

SEL 的主要表现形式为瞬态异常大电流。实验时，通过摄像机对辐照室内的直流稳压电源的电流指示进行监视，观察并记录电流变化情况。

4 实验结果

4.1 配置存储器单粒子翻转

调节束流强度为约 200 ions/cm²，记录配置存储器中的单粒子翻转数量和检测时刻，结果曲线见图 2。

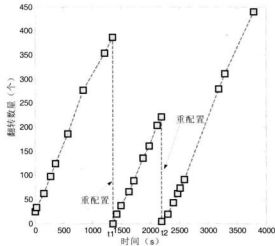


图 2 配置存储器中的单粒子翻转

在 t₁时刻对 FPGA 进行了一次重配置，随即检测发现配置存储器中的 SEU 已经全部被恢复。t₂时刻又进行一次重新配置，所有翻转亦被修复。

在离子注量为 63450 ions/cm²时，在配置存储器内共检测到 1018 次 SEU，由于其配置位总量为 3744768bits，扣除 BRAM 占用的 737280bits 后为 3007488bits。计算得到 XC2V1000 的配置存储器翻转截面结果见表 3。

表 3 配置存储器单粒子翻转截面

LET (MeV·cm ² /mg)	23.57
注量 (ions/cm ²)	63450
翻转数 (upsets)	1018
翻转截面 (cm ² /bit)	5.33×10 ⁻⁹

然而，计算出的翻转截面结果与 Koga 等^[1]得到的重离子实验结果存在比较大的差异。经分析，确定其原因是由于开帽面积过小所致：由于器件边缘含有易被酸性溶液腐蚀的金属线，为避免损坏器件，开帽面积为器件中间的小部分区域（见图 1），经过与另一个全部开帽的器件（已损坏）的测量对比，被测 FPGA 开帽面积约占该器件晶圆面积的 1/5。由于重离子的射程无法穿透数毫米厚度的封装材料，入射到开帽区域以外的离子自然无法引起翻转，必须对该结果进行修正。根据 FPGA 配置存储器的帧结构特性，可以认为配置存储位的分布在器件内部是均匀的。则总共被照射的配置存储器位数应为总配置存储器位数乘以开帽面积占总晶圆面积的比值，即 1/5。修正后的翻转截面约为 2.67×10⁻⁸ cm²/bit，这一值与 Koga 所进行重离子实验得到的曲线符合良好。

4.2 Block RAM 单粒子翻转

BRAM 的测试过程与配置存储器测试相似。但是,从数据结果中发现其中一组 BRAM 的翻转率明显高于其他两个,见表 4。分析其原因,应该也是由于该组 BRAM (70~79) 位于芯片几何位置的中间,而其他两组 BRAM 块位于芯片的靠边缘位置,因开帽范围比较小所致。因此,准确的翻转截面应该是第二组 BRAM 帧所测量得到的结果,即 $3.22 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。

表 4 Block RAM 中的单粒子翻转实验结果

Frame No.	离子注量 (ions/cm ²)	翻转数 (upsets)	翻转截面 (cm ² /bit)
0~9	34968	3	2.53×10^{-9}
70~79	52170	57	3.22×10^{-8}
200~209	32994	4	3.57×10^{-9}

4.3 TMR 抗单粒子翻转能力测试结果

TMR 容错机制成立的前提条件是任意两个冗余模块不可能同时发生故障。但是当配置存储器中的 SEU 累积后,就会引起 TMR 电路中三个冗余模块中至少两个模块产生错误输出,从而使得表决器无法进行正确判断,导致 TMR 失去容错功能。表 5 中记录了不同束流强度(即注量率)下,采用 TMR 容错机制的中频直接序列扩频信号捕获单元从开始注入离子到发生失效的时间以及发生失效时的离子注量。

表 5 TMR 效用测试结果

时段	束流强度 (ions/cm ² /s)	失效注量 (ions/cm ²)	失效时翻转数量 (upsets)
0	300	6.9×10^4	134
1	300	9.6×10^4	207
2	100	8.9×10^4	187
3	80	6.4×10^4	128

从表 5 中的结果可见,该 TMR 加固电路本身对配置存储器的 SEU 的容错能力是有限的。这主要是由 FPGA 的特定结构特点决定的:配置存储器的翻转引起的不是瞬态故障,而是用户逻辑电路的永久性故障,除非对配置存储器内容进行重新写入,SEU 会一直影响用户电路的功能。随着 SEU 的累积,三个冗余模块中两个以上的模块都受 SEU 影响发生故障,造成表决器的迅速失效。

对 FPGA 的配置存储器进行周期性的动态擦洗不会干扰 FPGA 所实现电路的正常运行(用户设计中用 LUT 资源构建了用户存储器或移位寄存器的情况除外),但却能够有效的修复发生在配置存储器中的 SEU。在动态擦洗机制配合下,对 TMR 效用的测试结果见表 6。

表 6 TMR 效用测试结果(配合动态擦洗)

时段	束流强度 (ions/cm ² /s)	失效时间 (s)	失效时翻转数量 (upsets)
0	100	20 分钟内无失效	--
1	300	20 分钟内无失效	--
2	5000	80	146
3	10000	28	273

从表 6 中可看到,当结合动态擦洗机制后,TMR 的失效注量明显提高。但是当注量率提高后,由于擦洗率(scrubbing rate)保持不变,TMR 仍会在较短时间内发生失效。而且 TMR 发生失效后,

绝大多数情况下可以通过重新配置使得 TMR 电路恢复正常工作。

在实验中也观察到了持续性故障的存在。这类故障是由于发生在配置存储器中的 SEU 没有被及时修复, 通过时序电路中反馈单元的传播, 影响了用户逻辑中的敏感单元。持续性故障无法通过重新配置修复。在向 Prog_B 引脚施加负脉冲对整个 FPGA 进行复位重配置后, 电路才从持续性故障状态恢复正常。

4.4 单粒子门锁实验结果

在实验的最后阶段, 进行了 XC2V1000 的抗单粒子门锁能力实验。以 $100\sim 500\text{ ions/cm}^2\text{s}$ 的束流强度对 FPGA 进行离子辐照, 在长达 4 个小时的观测时间内, 电路板的工作电流从 500mA 上升到 2600mA, 但是并没有观测到符合单粒子门锁特征的电流的快速增长现象, 而是呈现出随 SEU 数量增加逐渐增长现象, 见图 3。

其原因主要是由于配置存储器内部单粒子翻转引起了走线资源的短路、桥接、开路等异常, 而引起电流缓慢增长。在电流缓慢上升的过程中, 大部分时间内 FPGA 内部电路处于正常工作状态。即使出现了故障, 也能够复位重配置后, 恢复正常工作状态, 同时电流也能恢复到初始工作状态的 500mA 左右。

据此可初步判定该器件的抗单粒子门锁阈值不小于 $80.14\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 这一值符合了多数航天器的安全设计规范。而 Xilinx 的宇航级 FPGA 产品给出的抗 SEL 阈值为 $120\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

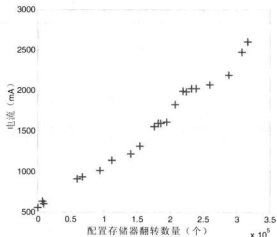


图 3 配置存储器SEU数量与电流变化趋势

在单粒子门锁实验中还发现当注量超过 $5.3\text{e}6\text{ ions/cm}^2$ 时, JTAG 回读器件 IDCODE 时出错, 回读无法进行的现象。即单粒子效应引起了 FPGA 发生 SEFI。通过在配置选项中选择“Pulse Prog_B”选项复位重新配置后, 器件恢复正常。

4.5 实验结论

通过兰州重离子加速器对 XC2V1000 进行了多项实验, 其结论总结如下:

(1) XC2V1000 的配置存储器和 BlockRAM 对 SEE 非常敏感, 在有效 LET 值为 $23.57\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 翻转截面分别为 $2.67\times 10^{-8}\text{ cm}^2/\text{bit}$ 和 $3.22\times 10^{-8}\text{ cm}^2/\text{bit}$, XC2V1000 器件的总翻转截面为 $0.10\text{cm}^2/\text{device}$ 。

(2) 调整入射倾角, 使得入射离子 LET 值达到 $80.14\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 以 $100\text{ ions/cm}^2\text{s}$ 的束流强

度进行单粒子门锁实验,在4个小时的观测时间内,仍未能观测到符合单粒子门锁特征的故障现象,且经过重新配置后,FPGA能够恢复到正常工作状态。证明该器件的抗单粒子门锁阈值LET不小于 $80.14\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

(3) TMR能够较大幅度提高系统单粒子效应防护能力,但导航业务特点对连续工作能力的要求极高,单纯依靠TMR设计仍然不能满足导航使用要求。动态擦洗可以避免SEU在配置存储器中的累积效应,结合TMR对单点失效极高的屏蔽能力,组合措施将取得很好的效果。

(4) 动态重置可以有效恢复多数SEU引起的故障现象。但是实验中也观察到了SEFI现象和单粒子翻转引起的持续性故障现象,对于这两种情况,必须对FPGA进行复位重置,但对于Virtex-II FPGA,这一复位过程无需重新上电。

5 结论

导航卫星对核心元器件的空间辐射环境适应性提出了极高的要求,而辐射易感的高性能数字器件应该是适用性研究的关注重点。一方面,提高导航系统性能需要依赖这类器件的支持;另一方面,其辐射可靠性水平不高又直接影响着导航系统的可用性和连续性。

本文通过HIRFL实验数据支持,对SRAM型FPGA的导航适用性做了初步分析。在结合多种设计加固措施后,可以将基于FPGA的系统的单粒子效应风险有效降低至普通专用芯片的水平。结合我国集成电路工业的发展现状,我们认为在导航卫星研制中,尚且不能完全放弃对商用现货高性能FPGA的依赖,可以考虑制定专门的加固设计规范来约束各单机的抗辐射设计加固。同时,对FPGA单粒子效应可能引起的各种故障都应该配备完备的星上自主恢复与自主完好性报告机制。在多重因素的共同作用下,确保导航卫星性能先进、安全可靠。

参考文献

- [1] Koga R., George J., Swift G., 等. Comparison of Xilinx Virtex-II FPGA SEE sensitivities to protons and heavy ions[J]. Nuclear Science, IEEE Transactions on, 2004,51(5):2825-2833.
- [2] Yui C. C., Swift G. M., Carmichael C., 等. SEU mitigation testing of Xilinx Virtex II FPGAs: Radiation Effects Data Workshop, 2003. IEEE, 2003[C].
- [3] Morgan K, Caffrey M, Graham P, et al. SEU-induced persistent error propagation in FPGAs[J]. Nuclear Science, IEEE Transactions on, 2005,52(6Part 1):2438-2445.

卫星导航系统监测站覆盖性能分析及布设方法初步研究*

李作虎¹ 郝金明¹ 李建文^{1,2} 赵齐乐² 张成军¹

(1.信息工程大学测绘学院, 河南 郑州, 450052;

2.武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079)

摘要: 监测站作为卫星导航系统控制段的重要组成部分之一, 对系统基本服务功能的提供和各项性能指标的保持都具有重要意义。提出了一种用于监测站覆盖性能评估的模型: 基于该模型以 GPS 为例对单个监测站覆盖性能、站际重叠覆盖性能以及监测网整体覆盖性能进行了实验分析, 结果表明该模型可以用于监测站性能评估和布网设计及优化; 采用模拟仿真的方法对 GPS 地面监测站的故障敏感性进行了分析, 确定了在整个监测网络中具有重要影响以及能够导致较大完好性风险产生的监测站; 最后探讨了监测站的布设方法, 给出了一种基于覆盖性能的分期分级布设方案。

关键词: 卫星导航系统; 监测站; 覆盖性能; 故障分析;

Primary study on coverage and distributing methods of satellite navigation system Monitor Stations

Li Zuohu¹ Hao Jinming¹ Li Jianwen^{1,2} Zhao Qile² Zhang Chengjun¹

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Henan Zhengzhou, 450052, China;

2. Navigation and Positioning Technology Research Center, Wuhan University, Hubei Wuhan, 430079, China)

Abstract: As one of the important components of satellite navigation system control segment, Monitor Stations are of great significance for the provision of system basic service function and the maintenance of all performance indexes of the system. A model used for the assessment of Monitor Stations coverage is given, which can be used as the basis to carry out tests and analysis on three aspects including the coverage of single station, the overlap of two stations and the whole coverage of Monitor Station net, taking GPS for instance. The results show that this model is effective to evaluate the Monitor Station coverage and design the net and optimize it. Then the sensitivity analysis of GPS ground station outages is carried out, which determines the stations that are of great influence and can be resulted in larger integrity risks. And the distributing methods of Monitor Station are discussed with a scheme by stages and classification based on the coverage.

Key words: satellite navigation system; Monitor Station; coverage; outage analysis

1 引言

监测站作为卫星导航系统地面控制段的重要组成部分之一, 承担着重要而关键的任务。监测站的作用可以概括为两点: 一是辅助主控站完成维持系统基本功能的任务, 包括求取定轨、卫星钟差等关系到卫星导航系统导航、定位以及授时的基本功能的重要参数; 二是实时监控整个系统的运行状况, 从而提高整个系统的精度、完好性、连续性和可用性。由于监测站与卫星导航系统的服务性能密切相关, 因此, 监测站的可靠性和布设的合理性对于卫星导航用户, 特别是航空等关系到生命安全的用户而言, 具有重要意义。

美国具有得天独厚的条件, GPS 监测站得以在全球布设。然而由于监测站的限制, 诸如监测站

*基金项目: 卫星导航与定位教育部重点实验室(B类)开放基金课题(GRC2009005)

的地理位置分布,设备的可靠性以及通信链路的可靠性等因素,即使到目前,GPS地面监测网还不能够对每一颗卫星的监测做到100%。不过,这种状况正在通过目前进行的精度改进计划(Accuracy Improvement Initiative)得以改善。由于这种状况的存在,文献[1]认为,尽管非常不可能,但是在地面控制部分发现并进行干涉之前完好性故障存在时间达到20/3小时的现象还是有一定的发生概率。在2001年7月28日,当时处于南太平洋区域上空的22号卫星的时钟发生了故障,结果导致用户测距误差URE超过200000m。在半个小时内,GPS控制段都没有检测到这个问题,因为当时对于控制段的任意监测站而言,该卫星都是不可见的^[2]。

目前我国的卫星导航系统还处在建设阶段,必然会涉及到地面监测网络的布设和建设。本文主要从监测站覆盖性能的角度为监测站的布设和优化提供一定的参考依据。

2 监测站的覆盖性能评估模型

2.1 评估参数定义及模型介绍

卫星导航系统监测站的覆盖性能指的是在一个特定的时刻或时间段内可以同时对一颗卫星进行观测的监测站的数目。

进行监测站的覆盖性能评估,需要首先明确卫星的飞行区域,这是一个与星座内所有卫星的轨道参数相关的参数^[3]。对于同构星座而言,由于采用的卫星轨道类型相同,所以其飞行区域主要由卫星轨道倾角决定,以GPS为例,即南纬55°至北纬55°之间的区域;对于异构星座而言,由于采用的卫星轨道类型不相同,导致其飞行区域不是很规则。通常,对于由MEO、GEO和IGSO构成的混合星座而言,可以对MEO和IGSO的飞行区域分别进行研究。其次,该区域还与卫星的平均飞行高度有关系。卫星的飞行区域是监测站监测的目标区域;通常情况下,只要是在目标区域内,则卫星就一定会被监测到的。

其次,需要将卫星的飞行区域划分为有限个格网。根据每个格网点的坐标以及所有需要评估的监测站的坐标计算对应的夹角,判断格网节点是否在监测站的可视范围内;并遍历所有的格网节点,统计所有格网节点被所有监测站覆盖的情况。

为了评估卫星在飞行区域内的被所有监测站覆盖的程度,定义一个衡量标准 C ,如下式

$$C = \sum_{i=1}^N k_i \quad (1)$$

其中, k_i 为第 i 个方格中可以看到监测站的数目。 N 为格网节点数目。本文的分析中 N 等于10136。

(1)式反映了每个监测站对于飞行区域的整体覆盖性能,而没有考虑是否发生了重叠覆盖。

在(1)式的基础上定义 $\bar{C}$ 来表征平均每个格网节点有几个监测站可以看到:

$$\bar{C} = \frac{C}{N} \quad (2)$$

2.2 影响因素实验分析

2.2.1 单站覆盖性能

以全部由MEO组成的同构星座为研究对象,假设其平均飞行高度为20000km,飞行区域为南纬55°至北纬55°,出于分析精度和计算复杂度的折中考虑,选择2度的格网划分方案,共划分格网10136个。由于飞行区域是环状的,所以单个监测站的地理经度对覆盖范围没有影响,决定其覆盖范

围的主要因素是纬度。如图 1 所示,位于同一经度不同纬度(分别为 0, 5, 10, 15...50 度)的 11 个监测站的覆盖性能图,其监测站接收机的卫星截止角设为 10 度。图 2 为 11 个监测站在不同截止高度角时的服务空域覆盖率。

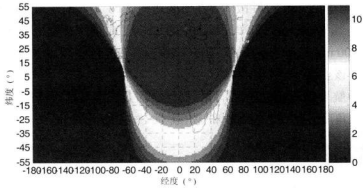


图 1 同一经度不同纬度的监测站覆盖性能变化图

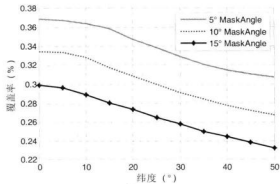


图 2 监测站覆盖性能与纬度和截止高度角的关系

综合图 1 和 2 可知,单个监测站的覆盖性能与地理纬度和截止高度角都有密切关系。在截止高度角一定的条件下,位于赤道上的监测站的覆盖性能最大;10 度以后由于覆盖区域逐渐向北平移,部分覆盖范围超出了飞行区域,导致覆盖性能随着纬度的增加迅速下降。该结论对于南半球有相同的结果。在纬度一定的条件下,截止高度角越低,覆盖性能越大。但截止角过低,会带来其它问题。目前一般采用 10 度;对于位于高纬度的监测站,可能会采用较大的截止角^[3]。

2.2.2 站际重叠覆盖性能

从图 1 可知,地理纬度在南北纬 10 度以内的单个监测站,在截止角为 10 度时,可以覆盖大约三分之一的飞行区域。因此,理论上只需要赤道附近设 3 个监测站即可基本覆盖整个飞行区域。然而,地面监测网络对飞行区域的一重覆盖不能完全满足系统部分性能指标的要求,必要时需要达到二重甚至多重覆盖,这就需要对监测站站际重叠覆盖进行分析。

基于图 1 的分析计算,在赤道附近的监测站其覆盖的经度范围最大为 134 度,也就是说,在赤道附近的两个监测站之间的经度只要小于这个值,就会产生一定的重叠覆盖区域。赤道附近监测站之间的经度与重叠覆盖区之间的关系如图 3 所示,测站之间的经度和覆盖重叠率之间几乎是线性关系,且随着截止角的增大而整体有大约 3% 的平移。另外,站际重叠覆盖性能与站间纬度也有相似的关系。

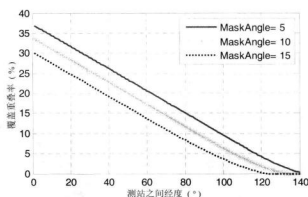


图3 站间重叠覆盖性能与站间经度的关系

2.2.3 监测站网的整体覆盖性能分析

以 GPS 为例, 分析监测站网的整体覆盖性能。GPS 系统最初只有 6 个空军监测站 (AF MS: Air Force Monitor Statios), 分别是阿森松岛 (Ascension)、迪戈加西亚 (Diego Garcia)、夸贾林 (Kwajalein)、夏威夷 (Hawaii)、科罗拉多泉城 (Colorado Springs) 和卡纳维拉尔角 (Cape Canaveral), 均分布在赤道附近。采用前文中的飞行区域设置, 在卫星截止角为 10 度时计算可得在飞行区域内卫星被这 6 个监测站构成的监测网的覆盖程度为: $C_{6MS} = 19139$; 另外, 每个格网点可以被监测到的平均监测站数目为: $C_{6MS_mean} = 19139/10136 = 1.888$ 。图 4 是 6 个空军监测站网的覆盖性能。

图中, 绝大部分飞行区域被至少 1 个监测站可视, 有部分区域可视的监测站数目甚至达到 4 个。但是, 还有一定的区域, 主要是南太平洋区域, 存在监测空白区。这也是导致 2001 年 7 月 28 日 22 号卫星长时间出现故障的主要原因。从完好性的角度出发, 监测空白区内卫星一旦出现故障, 系统不会及时发现并进行相应的处理, 并向用户告警, 即产生较大的完好性风险 (Integrity Risk)。图 4 中的监测空白区占所有飞行区域的 4.02%。

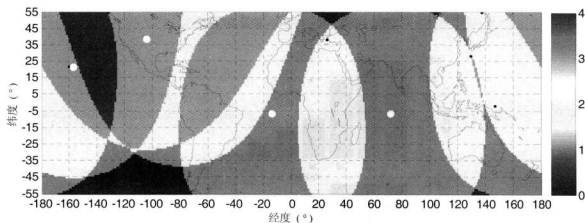


图4 GPS 6个AFMS的覆盖性能

从 1996 年开始, 美军开始了旨在改善和提高 GPS 精度的精度改善计划 AII (Accuracy Improvement Initiative), 其中一项重要工作是把美国国家地球空间情报局 (NGA) 的 11 个 GPS 卫星监测站纳入 GPS 的卫星地面监测网络中, 使监测站数量成倍增加, 提高单颗卫星的覆盖冗余度, 从而提高系统的各项性能指标。截止 2005 年 9 月, 已经有 6 个 NGA 监测站并入到 GPS 卫星地面监测网络中。并