

FY-4A 闪电成像仪 FPGA 单粒子翻转防护

康宁^{1,2} 郭彦^{3*} 惠雯² 何兴伟² 彭艺²

(1 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2 国家卫星气象中心, 北京 100081;
3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/地理科学学部, 北京 100875)

摘要 FY-4A 卫星是我国首次星载闪电成像仪的静止气象卫星, 其采用的可重载型 FPGA 芯片可连续在 2 ms 时间, 按像元完成针对 400×600 像元的多帧闪电信号数据处理, 实时生成闪电数据及地标观测数据, 并具有在轨软件上注更新配置功能。由于近地空间环境复杂, 因此 FPGA 属于单粒子翻转敏感器件, 需要采用多种手段进行单粒子翻转防护。在 FY-4 地面应用系统工程建设中, 根据 FPGA 单粒子翻转对闪电探测产品所造成影响的不同, 结合闪电事件数据逻辑关系、系统资源等情况, 设计并在地面系统中部署了单粒子检测程序, 实现了 FPGA 单粒子翻转异常自动辨识; 根据闪电观测任务特点、闪电探测产品恢复时效性要求, 同时采取自动判别与自动发令、动态刷新与定时刷新、软件复位与硬件复位等多种单粒子翻转防护综合措施, 实现了 FPGA 单粒子翻转自动恢复。通过以上工作, 目前 FY-4A 闪电成像仪已经有效地减少了单粒子翻转效应对闪电探测产品的影响。

关键词 闪电成像仪; FPGA; 单粒子翻转; 防护

中图分类号: P407 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20180110 **文献标识码:** A

引言

FY-4A 卫星作为我国新一代静止轨道气象卫星的首发试验卫星, 于 2016 年 12 月 11 日成功发射。卫星平台采用先进的三轴稳定姿态控制方式, 主要搭载了多通道扫描辐射成像仪、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间环境监测仪等四台仪器, 其中 FY-4A 闪电成像仪主要功能是连续实时监测中国区域及邻近地区的总闪电。目前全球搭载闪电成像仪的静止卫星仅有 FY-4A 与 2016 年 11 月发射的美国 GOES-R^[1-3]。

FY-4A 闪电成像仪分系统实现闪电信号检测处理的部组件是 RTEP(Real Time Event Processor, 实时事件处理器), 闪电成像仪星上实时事件处理算法包含信号限幅、逐像元多帧背景实时评估、背景去除、阈值自适应设置、闪电事件判断、闪电事件排序、闪电事件编码等功能。该部分功能实现采用 SRAM(Static Random Access Memory, 静态随机

存储器)型可重载 FPGA(Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列), 具有信息密度大、性能高和灵活的编程配置能力^[4-7], 使其具有在轨程序上注更改的重新配置功能。

FPGA 各可编程功能模块由内部不同的存储资源构成, 这些存储资源存储着电路结构功能的配置信息及其电路工作状态信息^[8-10]。在一些电磁、辐射环境比较恶劣的情况下, 由宇宙中单个高能粒子射入半导体器件灵敏区, 使器件逻辑状态翻转的现象称为单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)。单粒子翻转会导致 FPGA 中存储单元的内容改变, 导致计算结构错误、程序执行序列错误等^[11-12]。FY-4A 闪电成像仪使用的 FPGA 是 Xilinx 公司的 XQR2V3000。ESA 对 Virtex II 工艺生产的 300 万门 FPGA XQR2V3000 的单粒子试验数据, 给出的饱和截面为 $3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{b}^{-1}$, LET(Liner Energy Transfer)阈值为 $2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ^[13-15]。

国内外在星载 FPGA 单粒子翻转及其危害方

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

风云四号 01 批静止气象卫星地面应用系统工程项目资助

作者简介: 康宁, 男, 1980 年生, 硕士在读, 高级工程师, 主要从事气象卫星技术研究, Email: kangn@cma.gov.cn

收稿日期: 2018 年 2 月 28 日; 定稿日期: 2019 年 9 月 24 日

* 通信作者, Email: guoyan@bnu.edu.cn

面有了多方面的探索和思考,其中王长河就单粒子翻转的物理机理,以及对卫星在空间环境中运行的影响情况进行了研究^[16],薛茜男等开展了 FPGA 器件在航空高度下电子设备可能遭遇的单粒子翻转效应的风险问题研究^[17],冯兴等采用故障注入的方式针对 FPGA 中不同硬件资源对于 SEU 效应的不同敏感性进行了分析^[18],侯建文等对某型 FPGA 的单粒子翻转情况进行了统计分析,并就翻转事件的空间分布及差异性进行了分析^[19]。星载仪器中搭载的 FPGA 主要有反熔丝和 SRAM 两种类型。其中前者应用更加广泛,主要用于卫星控制系统及所属星载电子产品,在单粒子翻转后对卫星姿态及控制造成影响。FY-4A 闪电成像仪所采用的 SARM 型 FPGA 应用于星上预处理闪电数据,单粒子翻转后仅对闪电数据的处理造成影响。其常见异常为闪电时间错误,闪电背景评估值与阈值错误,闪电事件分区、位置和强度错误,闪电位置校验错误。闪电成像仪在轨期间,监测到单粒子翻转发生后在观测数据上的表现形式,主要是连续多帧突发密集闪电频次数据。以 2017 年 2 月 13 日发生的单粒子翻转后闪电频次数据分布情况为例(图 1)。

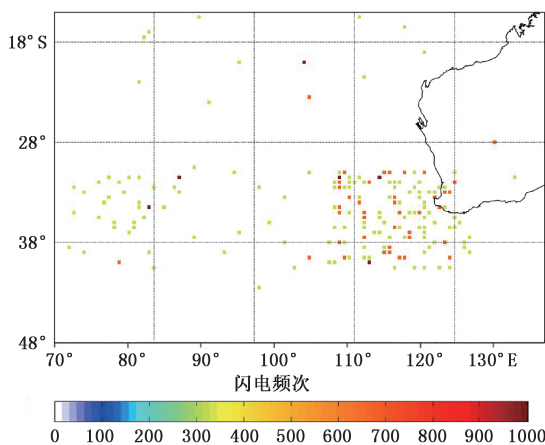


图 1 2017 年 2 月 13 日闪电成像仪发生单粒子翻转后的闪电频次观测数据分布

图中给出的是单粒子翻转事件发生后,闪电成像仪获得的 1 min 闪电频次观测数据分布,从图中可见在西南和北部几个区域,连续出现非常密集的闪电频次数据,根据对当地天气情况和闪电事件数据的分析,可知该现象是由于发生了单粒子翻转引起的错误现象。图 2 是在未发生单粒子翻转情况的正常观测数据。

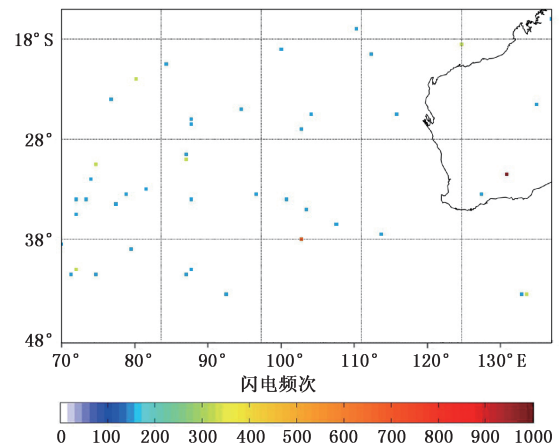


图 2 2017 年 2 月 13 日闪电成像仪正常闪电频次观测数据分布

比较单粒子发生后和正常情况下的观测数据,可见单粒子翻转事件对 FY-4A 闪电成像仪闪电观测工作状态产生严重影响。国内外针对星载 FPGA 单粒子翻转的防护进行了大量的研究工作,防护设计主要针对星载设备的软硬件优化,其中郭强等提出在星上安装现场可编程门阵列(Actel FPGA)作为检测芯片,发现出错则重新加载配置文件,消除单粒子翻转的影响^[20]。李巍等提出了从软件方面防范和解决单粒子反转的 FPGA 可靠性设计技术,并验证了设计方案^[21]。周凯等比较分析了几种抗单粒子翻转方法的适用范围、使用特点及应用情况等,认为动态重新配置是最为有效的单粒子反转防护措施^[22]。

作为全球首批搭载闪电成像仪的静止气象卫星, FY-4A 卫星搭载的 FPGA 芯片生成的闪电观测数据是我国首次在地面应用系统中处理卫星观测闪电数据,数据类型种类多,时效性强。卫星在轨业务运行期间,无法针对星上设备进行优化。并且单粒子翻转无遥测报警,只能在地面应用系统的建设中,针对异常闪电数据额外开发自动判识程序。并在地面应用系统中进行合理部署,减少响应时间。在 FY-4A 闪电成像仪的运行保障工作中,技术人员能够掌握基本的判断单粒子翻转情况的方法和防护流程,但是由于单粒子翻转发生时间随机性强,并且闪电成像产品为 1 min 高频次产品,仅凭人工防护无法在长期业务运行期间做到高时效性响应。

因此,必须针对 FY-4A 闪电成像仪 FPGA 的单粒子效应进行研究,分析单粒子翻转造成的多类

型闪电事件错误数据,建立单粒子自动检测系统,并设计多种方法相结合的单粒子翻转防护措施,提高其可靠性。

1 数据和方法

1.1 数据

FY-4A 闪电成像仪于 2016 年 12 月 27 日开始进行闪电探测,其 FPGA 处理的闪电事件数据类型包括:闪电位置、闪电强度、背景评估值、阈值和位置校验码。其中各类型闪电数据的含义为:

闪电位置:闪电事件对应的位置;

闪电强度:当前帧去除背景评估值后的像素的信号值;

背景评估值:当前帧像素的背景评估值;

阈值:当前帧像素使用的阈值;

位置校验码:对闪电位置进行按字节异或,生成校验码;

闪电时间:当前帧的时间。

在闪电探测模式下,FY-4 地面应用系统首先将闪电探测模式闪电探测连续数据分成 L1C 数据包,每个数据包的有效信息是 Event 探测数据,以及与每个 Event 的行列号位置信息、辐射强度计数值、对应的背景估计值计数值等。基于利用闪电成像仪 L1C 数据,根据静止卫星闪电仪的技术特点,利用定标定位后的 L1C 级数据生成闪电仪定量和成像的高时效 L2 级产品,生成覆盖区域闪电分布频次、季节变化特征的闪电仪 L3 级产品。本文中所分析的数据基于 FY-4 闪电成像仪 L0 数据,用于闪电成像仪 RTEP 星上算法状态实时监测和评估。

1.2 方法

由于 FY-4A 闪电成像仪在轨首要任务是探测到闪电事件,由于研制之初,我国对空间光学闪电探测理论和闪电探测算法的基础薄弱,为保证在轨有效探测到闪电事件,在闪电探测算法硬件上采用了 SRAM 型可重载 FPGA,使其具有在轨软件上注更改的重新配置功能,因此在近地空间易受单粒子翻转干扰。

近地空间环境由多种环境要素组成,根据目前认识,对卫星和有效载荷影响较大的空间辐射效应主要有:总剂量效应、单粒子效应、充放电效应、高能电子的内带电效应、太阳电池等离子体带电效应等^[23-25]。闪电成像仪在设计和研制过程中有效地避免了总剂量效应、充放电效应、高能电子的内带电

效应的影响。能够引发单粒子效应的空间带电粒子有:地球辐射带捕获质子,银河宇宙线高能粒子,太阳宇宙线高能粒子^[26]。

根据 FY-4A 卫星闪电探测数据的类型进行分析,闪电位置、闪电强度、背景评估值、阈值和位置校验码的单粒子效应特点各不相同,对闪电探测产品生成所造成的影响程度也不同。在 FY-4 地面应用系统建设中,需要保证时效性与准确性的同时,在业务运行中针对多种闪电数据单粒子效应逐一进行判断。再结合闪电观测任务特点、可靠性要求、系统资源等情况,在地面应用系统设计中,依据闪电成像仪的闪电观测任务特点,采取软硬件相结合等多种针对性的单粒子翻转防护综合措施,确保业务运行的正常开展。

2 FPGA 单粒子翻转判断与防护方法

FY-4A 闪电成像仪 RTEP 星上算法使用的数据功能均由 SRAM 型 FPGA 芯片实现,单粒子翻转可导致逻辑功能错误。在轨期间,受空间单粒子影响引发单粒子翻转,造成输出闪电数据不符合约定的格式和逻辑。因此可通过输出闪电数据发生格式或逻辑错误来判断单粒子翻转。

2.1 闪电时间单粒子翻转判断

卫星向闪电成像仪广播整星时间,闪电时间为闪电产生对应的当前帧的时间,相邻帧的闪电时间具有连续递增特性,递增周期为 2 ms。如果递增周期超出范围,或者不具有递增特性,可能是 FPGA 芯片中闪电时间产生或与闪电数据组包过程中受到单粒子翻转影响,则判断为闪电 FPGA 受单粒子翻转影响。闪电时间单粒子翻转如图 3 所示。

2.2 背景评估值与闪电阈值的单粒子翻转判断

闪电成像仪在研制期间,实现了不同分级的闪电事件模拟。根据测试结果,载荷的闪电能量响应范围为 $3\sim 800 \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$,可满足自然界闪电能量范围在 $5\sim 500 \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ 的观测需求。载荷在探测范围内设定了闪电阈值范围,并根据我国晨昏线的变化设定背景评估值。其中 FPGA 芯片共定义 6700 个闪电阈值设定区,针对不同闪电阈值设定区分别定义对应的背景评估值与闪电阈值。闪电成像仪星上 FPGA 实时完成每个闪电阈值设定区的背景评估、背景去除、闪电阈值比较,提取出闪电信号。如果当前信号值大于所在闪电阈值设定区内背景评估值,则有

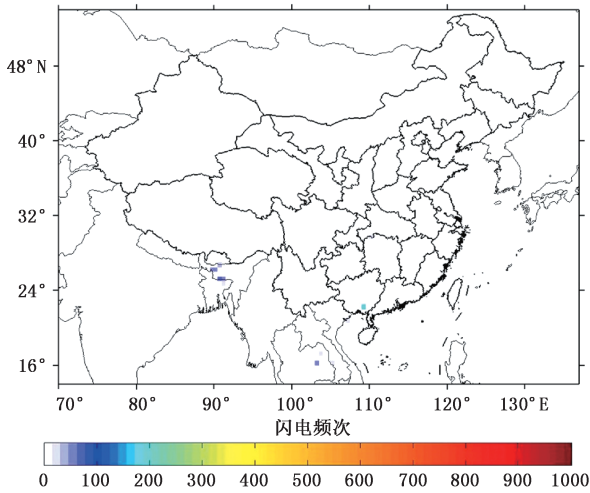


图 3 闪电时间单粒子翻转示例

可能是闪电信号,将该信号值减去背景值,然后与闪电阈值比较,若大于闪电阈值,则认为是闪电信号,将该闪电信号对应的背景评估值、闪电阈值、减背景后的闪电强度值编码向地面系统传输。

如果星上下传的闪电事件的背景评估值与闪电阈值,不符合对应闪电阈值设定区定义值,可能是单粒子翻转引起闪电事件算法模块进行背景去除、闪电事件组包模块进行闪电阈值比较出现异常,则判断为闪电 FPGA 受单粒子翻转影响。背景评估值与阈值的单粒子翻转如图 4 所示。

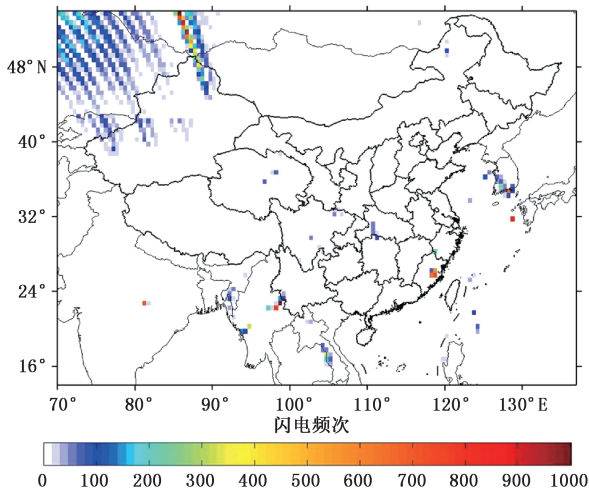


图 4 背景评估值与阈值的单粒子翻转示例

2.3 闪电事件分区、位置和强度单粒子翻转判断

闪电位置是闪电事件对应的 CCD 像元的位置,闪电成像仪分 8 个子区进行闪电探测。闪电成像仪

器研制期间,研制单位与国家卫星气象中心技术人员根据试验数据与我国闪电时空分布情况,设计了 8 个子区分布及输出闪电事件数目分布。根据闪电成像仪 FPGA 芯片的最大运算能力以及卫星载荷资源统筹考虑,设计每 2 ms 可识别的最大闪电数量为 120 个。其中各区域最大闪电数各不相同,按照最大闪电数量的顺序分别为:6,7,9,11,12,15,25,35。

闪电成像仪输出时按照子区域 1~8 的顺序、每个子区按照闪电强度大小的顺序共输出 120 个闪电事件信息。对下传的数据进行子区顺序、闪电强度顺序、子区闪电事件数目等判断,如果不符合闪电事件数目分布、闪电事件的子区、位置、强度的逻辑关系,则判断为闪电 FPGA 受单粒子翻转影响。我国全年闪电因季节变化时空分布波动性大,受到星地系统的限制,暂时无法实现动态调整各区分布最大值。目前设计的各分区最大闪电数量,在业务运行中会对单粒子翻转误判造成一定影响。2017 年 1 月至 2018 年 12 月在轨运行期间,因闪电事件数目分布造成误判约占全部单粒子翻转辨识的 2%。闪电事件分区、位置和强度单粒子翻转如图 5 所示。

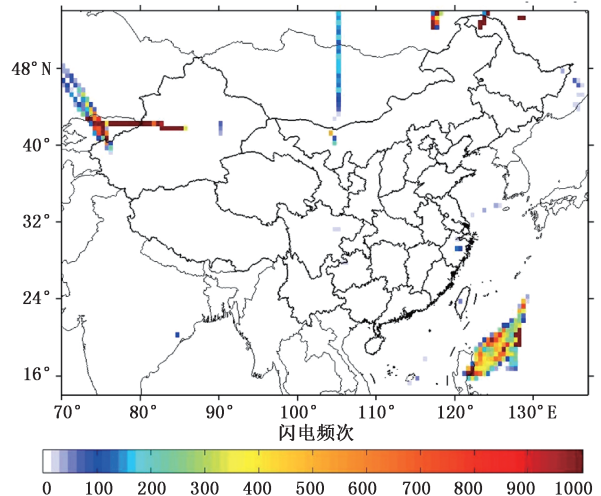


图 5 闪电事件分区、位置和强度单粒子翻转示例

2.4 闪电位置校验单粒子翻转判断

闪电位置校验码是对闪电位置进行按字节异或,生成 1 个字节校验码。目的是防止因闪电地址受单粒子影响而使得探测正确的闪电事件由于位置翻转成为虚假事件。在轨测试期间,发现因星地传输所造成误码率引起的闪电位置异常,数量少于 $10^{-8}/s$ 量级。国外针对单粒子翻转阈值做过许多

研究,其中 Malagón, Bota 等通过质子束和中子束照射实验并使用 Q 分析法测出阈值区间 $1 \sim 10 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 会引发误码率 $0.012\% \sim 0.05\%$ ^[27]; Huhtinen M 等通过重离子辐射并使用 Weibull 分布公式测出 LET 阈值处于 $2 \sim 20 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 之间时,饱和截面阈值为 $1.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{b}^{-1}$ ^[28]; C. L. Axness 等采用高剂量 Co-60 和低剂量 CS-137 辐射和 2D 电路模拟器仿真测算出阈值区间在 $12 \sim 30 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 时,饱和截面可降至 $10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{b}^{-1}$ 量级^[29]。

在设定闪电事件的位置校验错误数量阈值时,需考虑到由于数据传输误码率引起闪电位置异常,造成误判为单粒子翻转的因素。自然环境的放电过程中,单独闪电的空间长度大约为 $3 \sim 10 \text{ km}$,在同一地点连续放电概率极低。FY-4A 卫星闪电成像仪的分辨率设计为 7.8 km ,在同一帧内几乎不会出现空间上连续超过 4 个像元的闪电事件现象^[30]。为降低在传输过程中出现因误码引起个别闪电位置错误,所造成闪电位置校验单粒子翻转误判的概率,同时避免自动发令系统频繁发令影响业务成功率。设定如果超过 5 个闪电事件的位置校验错误,可能是闪电事件位置校验模块受单粒子翻转影响,则判断为闪电 FPGA 受单粒子翻转影响。闪电位置校验单粒子翻转如图 6 所示。

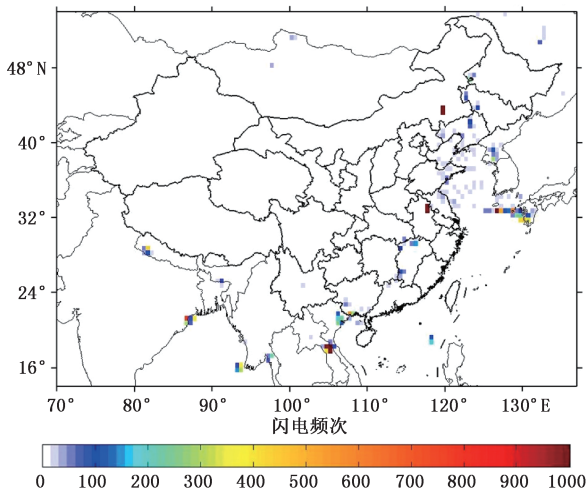


图 6 闪电位置校验单粒子翻转示例

2.5 闪电成像仪 FPGA 单粒子翻转的防护方法

从 FY-4A 闪电成像仪的闪电数据产生流程分析,应根据分包过程和产品生成过程,分别部署单粒子翻转自动防护以及单粒子噪声滤除综合消减单粒

子翻转的影响。根据单粒子翻转发生的时间随机特性,在闪电数据由星上传输至地面应用系统,进行分包处理过程中,单粒子翻转检测程序实时针对 L0 级闪电数据进行监测。在判别出单粒子翻转现象发生后经过识别判断发出报警信息。单粒子防护自动发令系统在收到报警信息后,发送闪电地面强制 FPGA 刷新指令,完成对星上闪电成像仪 FPGA 进行重新配置,对已发生的单粒子翻转错误进行恢复,配置时间约 20 s ,从而实现自主恢复小于 1 min 。在采取动态刷新的同时,通过每日定时 FPGA 刷新,消除累积单粒子翻转隐患。

闪电成像仪单粒子翻转后自动发令流程如图 7 所示。

在闪电数据生成闪电高频次产品过程中,可进行单粒子翻转噪声的滤除。单粒子翻转虚假闪电事件轨迹具有以下特点:

- (1) 出现时间具有突然性;
- (2) 呈直线状或分布区域边缘较为整齐;
- (3) 集中多个像元事件强度较大;
- (4) 在同一像元中连续长时间出现。

依据以上单粒子翻转噪声与真实闪电事件的辨别原则,设计实施了闪电事件产品的单粒子翻转噪声消除,闪电成像仪单粒子翻转虚假闪电事件滤除效果如图 8 所示。

3 结论与展望

FPGA 单粒子翻转防护是 FY-4A 卫星在闪电探测中必须解决的问题,本文针对闪电探测数据,系统分析和总结了各种闪电数据单粒子翻转效应的辨识特点和方法,进而对相应的单粒子翻转防护方法进行了讨论。通过近 2 年的在轨运行,实际业务测试表明:

(1) 单粒子检测程序针对多种单粒子效应总体辨识度超过 90% ,驱动实施实时刷新 12 次,指令发送成功率 100% ,实现了单粒子效应影响小于 1 min 。

(2) 单粒子翻转自 2017 年 1 月至 2017 年 9 月部署实施定时刷新前,共发生 9 次;2017 年 10 月至 2018 年 9 月,共发生 6 次。定时刷新减少了错误闪电数据量的累积,单粒子翻转发生概率低于部署前。有效提高了闪电数据产品的成功率,并减少了自动刷新对闪电数据影响。

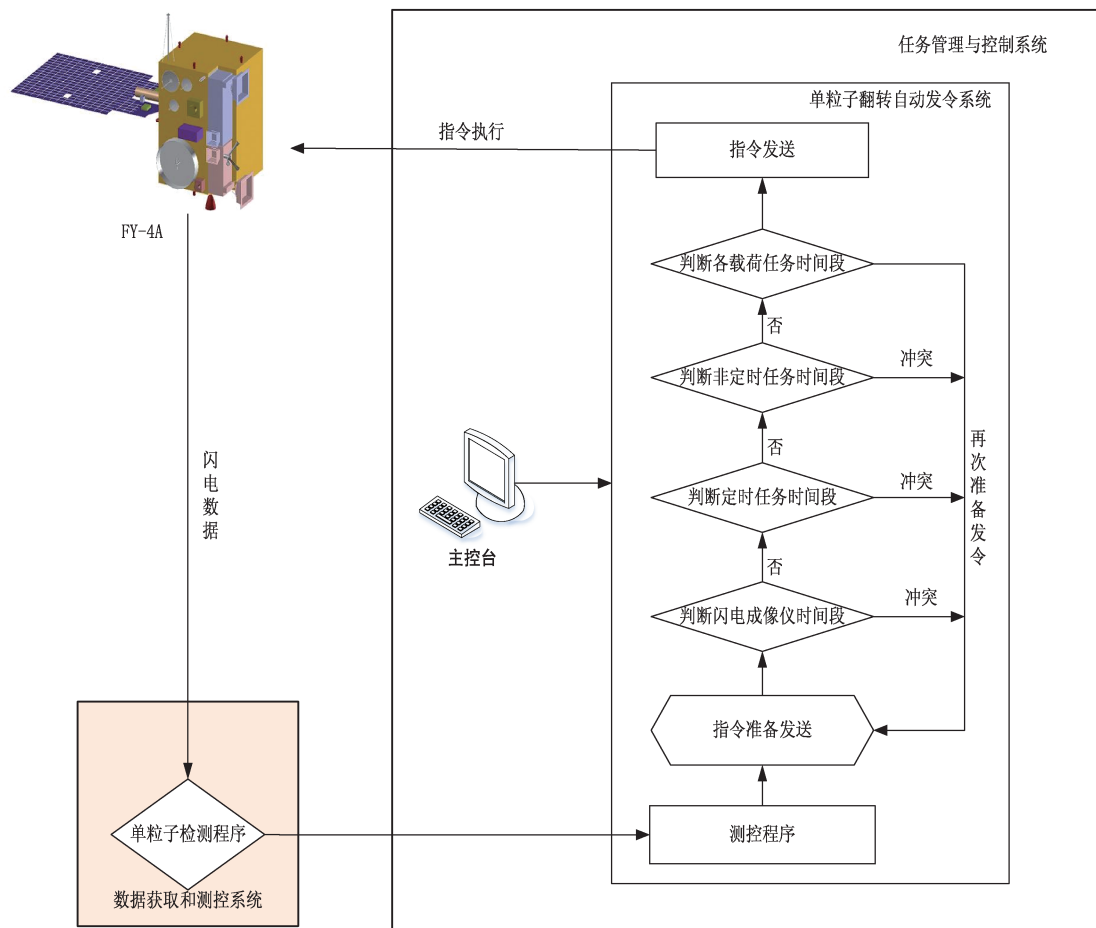


图 7 闪电成像仪单粒子翻转后自动发令流程

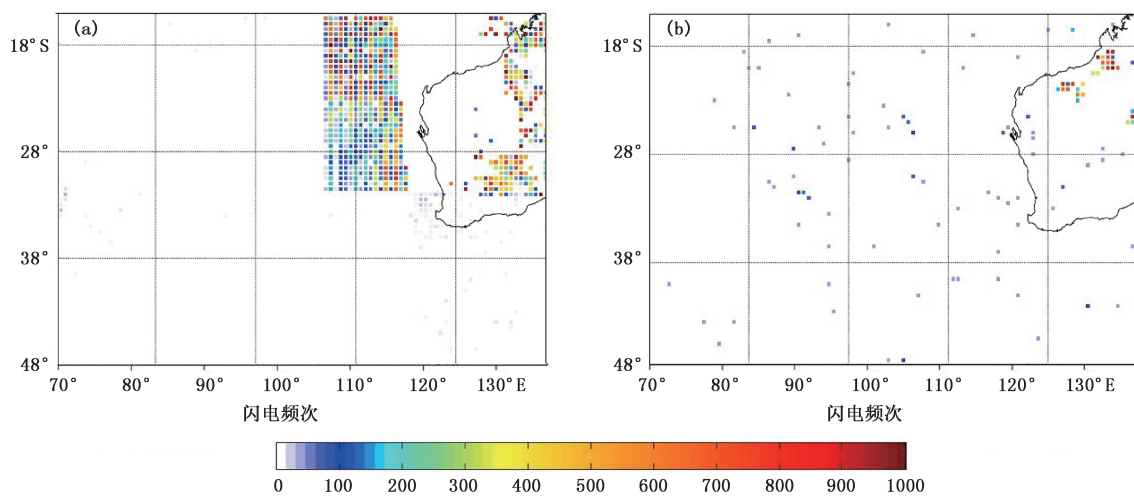


图 8 闪电成像仪单粒子翻转虚假闪电事件滤除效果：
(a)滤除效果前,(b)滤除效果后

(3)在持续性的空间天气活跃期,闪电成像仪工作状态基本稳定,暂不需要安排复位自动发令在常规业务运行时间表中。

FY-4A 闪电成像仪是中国首次运行的静止轨道闪电探测仪器,由于该型 FPGA 属于单粒子翻转敏感器件,在复杂空间环境中易导致单粒子翻转错误。因此,在风云四号地面应用系统建设中采取了单粒子翻转防护设计,结合闪电观测任务特点、可靠性要求、系统资源等情况,采取动态刷新与定时刷新等多种单粒子翻转防护综合措施,确保业务运行的正常开展。通过以上工作,目前 FY-4A 闪电成像仪已经有效地减小了单粒子翻转效应对业务的影响。

未来的研究主要关注如下几个方向:

(1)根据单粒子效应的不同,针对不同闪电数据类型,结合闪电数据在地面应用系统中的实际运行流程,可以采取虚假信号滤除的方法,设计适合滤除单粒子效应虚假信号的算法,减少对闪电数据的影响。本文仅针对单粒子噪声,其他类型的噪声及其滤除算法的研究将在后续工作中继续开展。

(2)未来建设地面应用系统中,应设计识别率更高、时效性更强的单粒子检测程序,并简单位单粒子翻转保护相关指令的发送过程,满足业务需求,体现 FY-4A 闪电成像仪针对闪电探测的持续性和即时性。

(3)利用在轨测试的实验数据、业务运行后的闪电观测数据,对比地基观测闪电数据以及其他卫星观测闪电数据,评估 FY-4A 闪电成像仪闪电探测的精度,改善和提高现有算法,优化星上设备,减少单粒子翻转发生的概率。

参考文献

- [1] 张鹏,郭强,陈博洋,等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 72-75.
- [2] 曹冬杰,闫欢欢,齐瑾. 中国对流层 NO_x 垂直柱总量分布特征及其与闪电活动的相关性分析[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 162-169.
- [3] 曹冬杰. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 94-98.
- [4] 张志清,陆风,方翔,等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [5] 梁华,鲍书龙,陈强,等. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 43-51.
- [6] 张志清,陆风,方翔,等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [7] 邱金娟,徐宏杰,潘雄,等. SRAM 型 FPGA 单粒子翻转测试及加固技术研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(8): 84-88.
- [8] 周永彬,杨俊. SRAM 型 FPGA 单粒子翻转失效率自动测试系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(10): 2272-2274.
- [9] 黄影,张春元,刘东. SRAM 型 FPGA 的抗 SEU 方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(4): 57-65.
- [10] 胡洪凯,施蕾,董暘暘,等. SRAM 型 FPGA 空间应用的抗单粒子翻转设计[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(5): 510-515.
- [11] 吕达,吴飞,陆华. 赛灵思静态随机存储器型 FPGA 单粒子翻转检测[J]. 航天器工程, 2010, 19(6): 96-101.
- [12] 杨文龙,陈丽,王伶俐,等. 基于 SRAM 结构的 FPGA 抗辐射布局算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 236-239.
- [13] ESA_QCA0415S_C Application-like Radiation Test of XTMR and FTMR Mitigation Techniques for Xilinx Virtex-II FPGA [EB/OL]. <https://escies.org/download/webDocumentFile?id=888>
- [14] ESA_QCA0605S_C Particle Test of Xilinx Virtex-II FPGA using XTMR Mitigation Technique [EB/OL]. <https://escies.org/download/webDocumentFile?id=5483>
- [15] JPL Publication 08-9 2/08. Assessing and Mitigating Radiation Effects in Xilinx FPGAs [EB/OL]. https://nepp.nasa.gov/DocUploads/08A3733D-6D42-428C-824E76B5B5A92B59/07-113%20Adell_JPL%20Assessing%20and%20Mitigating%20Rad%20effects.pdf
- [16] 王长河. 单粒子效应对卫星空间运行可靠性影响[J]. 微纳电子技术, 1998(1): 1-8.
- [17] 薛茜男,张道阳,李颖,等. 航空高度 FPGA 单粒子翻转飞行实验及失效分析[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(12): 78-84.
- [18] 冯兴,王大鸣,张彦奎,等. 基于 SRAM 型 FPGA 的 SEU 敏感性研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(5): 53-56.
- [19] 侯建文,张爱兵,郑香脂,等. FPGA 单粒子翻转事件在轨探测研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(4): 454-458.
- [20] 郭强,刘波,司圣平,等. SRAM-FPGA 抗单粒子翻转方法和预估[J]. 西安电子科技大学学报, 2018(1): 112-116.
- [21] 李巍,刘栋斌. 空间辐照环境下的 FPGA 可靠性设计技术[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011, 11(10): 12-14.
- [22] 周凯,聂晓慧,施蕾,等. SRAM 型 FPGA 空间应用的可靠性设计方法[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2016, 15(3): 25-32.
- [23] Jason J. Fault-tolerant Sequencer Using FPGA-based Logic Designs for Space Applications [D]. California: Naval Postgraduate School, 2013: 9-96.
- [24] Ciani L, Catelani M. A fault tolerant architecture to avoid the effects of Single Event Upset (SEU) in avionics applications [J]. Measurement, 2014, 54(6): 256-263.
- [25] Siegle F, Vladimirova T, Emam O. Mitigation of radiation effects in SRAM-Based FPGAs for space applications [J]. Acm Computing Surveys, 2015, 47(2): 1-34.

- [26] Wirthlin M J, Keller A M, McCloskey C, et al. SEU mitigation and validation of the LEON3 soft processor using triple modular redundancy for space processing [C]// Acm/sigda International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. ACM, 2016: 205-214.
- [27] Malagón D, Bota S A, Torrens G, et al. Soft error rate comparison of 6T and 8T SRAM ICs using mono-energetic proton and neutron irradiation sources [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 78: 38-45.
- [28] Huhtinen M, Faccio F. Computational method to estimate Single Event Upset rates in an accelerator environment [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A, (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, 2000, 450(1): 155-172.
- [29] Axness C L, Schwank J R, Winokur P S, et al. Single event upset in irradiated 16 K CMOS SRAMs [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1988, 35(6): 1602-1607.
- [30] 惠雯. 静止卫星闪电探测中的虚假信号滤除[J]. *气象科技*, 2015, 43(5):805-813.

Single-Event-Upset Protection on FPGA Loaded in Lightning Mapping Imager of FY-4A Satellite

KANG Ning^{1,2} GUO Yan³ HUI Wen² HE Xingwei² PENG Yi²

(1 Faculty of Geographical Science of BNU, Beijing 100875; 2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081;

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology of BNU, Beijing 100875)

Abstract: FY-4A is the first static meteorological satellite carrying a Lightning Mapping Imager (LMI), and the software implanted in the heavy-loaded chips which can be renewed automatically by receiving the signals from the earth station in 2 ms, is able to complete the data processing for the multiple-frame lightning signals in 400×600 pixel and generate the data in time, from lightning and ground marking objects. FY4A is a kind of SEU (Single Event Upset)-sensitive device and needs to use numerous methods to make a SEU protection due to the complexity of the near-earth environment. In the construction project of the ground application system of Satellite FY-4, in accordance with different effects of FPGA SEU on lightning detecting equipment, combined with data logical relationship amongst lightning affairs and systematic resources, we designed and arranged a single-event (SE) testing program and achieved the FPGA (Field Programmable Gate Array) SEU abnormality automatic identification. Meanwhile, according to the characteristics of lightning observation and the efficient requirement of lightning detecting equipment, we use multiple comprehensive methods such as automatic judgment and order, dynamic and timed refreshments, software and hardware recovery, etc., to secure an automatic recovery of FPGA SEU. Based on the above, the FY4A LMI has dramatically avoided the negative effect of SEU on lightning detecting equipment.

Keywords: LMI (Lightning Mapping Imager); FPGA (Field Programmable Gate Array); SEU (Single Event Upset); Protection