

在轨单粒子翻转与太阳活动变化的相关性研究

刘鹏程 邢克飞 何伟 张择龙 邓伟

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 长沙 410008)

摘要: 单粒子翻转(SEU)是空间仪器受辐射环境影响而产生的最常见的故障之一,而太阳活动是影响空间仪器所在的空间辐射环境的重要因素,为了分析太阳活动对空间仪器单粒子翻转的影响,总结了第24太阳活动周期中,2010年3月~2015年4月,来自3个不同低轨道面上的48个在轨仪器的单粒子翻转情况与太阳活动变化的关系。通过统计分析单粒子翻转数量随时间的变化规律以及对单粒子翻转与太阳黑子数量变化的相关性分析,发现单粒子翻转与太阳活动呈负相关,在太阳活跃期,单粒子翻转数变化曲线在延迟一段时间后与太阳黑子数变化曲线有较强的相关性。这一发现对空间仪器单粒子翻转的预测有重要参考价值,通过对太阳活动变化的观测评估预测特定时段内仪器在空间环境中的可靠性,从而通过设计应对的抗辐射加固方案来规避空间辐射风险。

关键词: 单粒子翻转;空间仪器;太阳黑子;太阳活动

中图分类号: TN609 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Study on correlation between solar activity and on-orbit SEU rate

Liu Pengcheng Xing Kefei He Wei Zhang Zelong Deng Wei

(College of Mechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410008, China)

Abstract: Single event upset (SEU) is one of the most common faults caused by the radiation environment of space instrument, and solar activity is an important factor affecting the space radiation environment of the space instrument. In order to analyze the effect of solar activity on the single event upset of space instrument in this paper, the relation between the solar activity changes of the 24th solar cycle and the on-orbit single event upset data are studied, which are collection from 48 instruments in three different low orbit satellites during March 2010 to April 2015. By combining the sunspot and SEU we found a negative relation between the solar activity with the SEU and the SEU curve after a specified delay had a strong correlation with the sunspot curve during the activity period, the lower the orbit, the better the correlation. This finding provides an important reference value for the prediction of the single event upset of space instrument. The reliability of the instrument in the space environment can be predicted and evaluated by observing the change of the solar activity for a specific period of time, so as to avoid the space radiation risk by designing the anti-radiation reinforcement scheme.

Keywords: single event upset; space instrument; sunspot; solar activity

1 引言

伴随着航天事业蓬勃发展,越来越多的空间仪器涌入太空,复杂多变的太空环境对空间仪器产生了辐射效应,从而引发航天器故障,而单粒子效应是空间辐射效应的一种主要表现形式,是空间仪器安全的重要威胁因素。影响低轨道航天器单粒子效应的高能带电粒子环境主要受到太阳宇宙线、地球内辐射带和银河宇宙线的影响^[1]。太阳宇宙线是太阳活动期间从太阳活动区喷射出来以高能质子为主要成分的高能粒子流。太阳活动对空间天气影响较大,易

导致航天器故障,活跃期太空中高能质子通量显著提升,这是导致单粒子事件频发的一个主要因素。随着微电子技术的不断发展,集成电路的工艺尺寸进入到了纳米时代,工艺尺寸减小带来性能提升的同时,也使其更容易受到高能粒子的影响^[2],其中SRAM型FPGA便是在广泛应用于航空航天领域的代表^[3],关于其单粒子效应的研究一直是行业的热点问题,国内外主要针对其抗辐射防护加固方面做了深入研究^[3-7]。而本文旨在找出太阳活动变化与单粒子翻转之间的规律,进而能通过对太阳活动的观测评估空间仪器可能受到的来自单粒子效应的风险,找出合理

应对办法,这将对空间仪器的抗辐射加固设计具有重要参考价值。

太阳活动周期的划分有多种方法,普遍认同的是以 11 年为周期,目前正处在第 24 个太阳活动周期,周期开始时间大约在 2009 年末。本文数据来自于轨道高度分别为 1 100、700 和 500 km 的 24 颗低轨道卫星的 48 个仪器上的 Virtex 系列 FPGA,最长数据的时间从 2010 年 3 月开始到 2015 年 4 月截止。本文通过在轨数据分析卫星单粒子翻转数与太阳活动的时间相关性。

2 数据与分析处理

太阳黑子数是描述太阳活动最重要的参数,长期的观测表明黑子多的时候其他太阳活动现象也会比较频繁,绝大多数太阳爆发活动现象也会发生在黑子上空的大气中,黑子既是太阳活动区的核心也是最明显标志,因此,太阳黑子数量常被用来作为衡量太阳活跃程度的重要依据,本文所用的黑子数来源于比利时皇家天文台的太阳黑子数与太阳观测小组 (<http://sidc.be/silso>)。本文截取 2002 年 1 月~2015 年 8 月的太阳黑子数据如图 1 所示,包括了第 23 和 24 两个活动周期,其中 2010 年 3 月~2015 年 4 月为本文研究对象,正处在第 24 太阳活动周期的前半周期,包含了太阳活动从平静期到活跃期的整个过程。太阳黑子的数量通常用来评估太阳的整体活动变化强度,2010 年太阳的黑子数很少,此时太阳活动很弱,称此时为平静期,2011 年到 2015 年之间太阳黑子数大幅度增加,活动十分频繁,称之为活跃期。

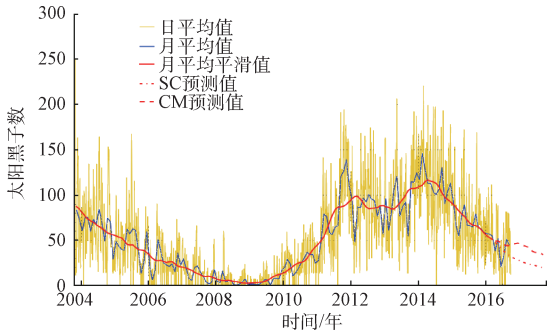


图 1 第 24 太阳周期太阳黑子数变化

单粒子翻转是由于高能粒子与 PN 结碰撞形成的电荷被收集形成瞬态电流而引起的电位反转^[8]。单粒子翻转与粒子的能量有较大的关系,在翻转阈值以下,单粒子翻转率与粒子能量成正相关。本文所选取的单粒子翻转 (single event upset, SEU) 数据来自 48 个在轨飞行的电子仪器 (图 2),他们所在的 3 个轨道高度分别为 500、700 和 1 100 km。其中最长在轨时间从 2009 年 11 月到数据的采集日期 2015 年 4 月。这些电子仪器所选用的元器件及电路结构完全一致,主要器件包括一个 A54SX32 型反熔丝 FPGA、一个 XC2V1000 型 Virtex-II FPGA 和一个高

频定点的 TMS320C6415 型 DSP,其中反熔丝 FPGA 作为高可靠单元对单粒子翻转的敏感性很低,具有很高的可靠性,将其作为 Virtex-II FPGA 的监测器,每 30 min 对 SRAM-FPGA 进行一次回读校验。监控 FPGA 将每次校验发现的 SEU 次数累加,并把累加计数添加到卫星的遥测数据中,然后对 Virtex-II FPGA 的配置位流进行一次刷新^[9]。

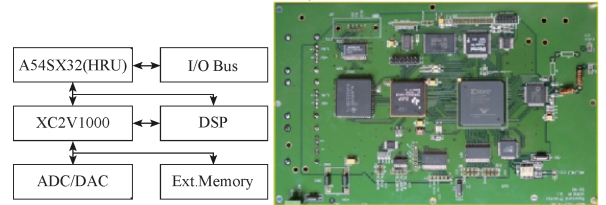


图 2 在轨仪器设计图

3 统计分析

3.1 SEU 与太阳黑子数变化的关系

由于地球近地空间辐射环境主要受到太阳活动的影响,单粒子翻转与太阳黑子的数量变化之间存在着联系。通过分别计算 3 个轨道面上仪器的日均单粒子翻转数,得出 3 个轨道面上各自所有仪器的平均值进行比较。如图 3 所示,图中描述了太阳黑子数量和 3 个轨道面上 SEU 日平均值的变化趋势,为了便于观察,采用移动平均法对所有数据做平滑,移动序列为:

$$T_i = \frac{y_{i-k} + y_{i-k+1} \cdots y_{i+k}}{2k+1} \quad (1)$$

式中: $k=15$,并将太阳黑子数缩小 50 倍以便于观察。同时,将观察期间内发生的太阳质子事件用红色星号标记在黑子变化曲线上。

太阳黑子数变化每 11 年才会呈现出一个明显的周期,由图 3 可知,太阳黑子数变化在短期内并没有表现出较好的周期性,能够明显观测到太阳活动在 2010 年处在平静期。2011 年黑子数量突然升高,出现了两个明显的峰值,太阳活动进入活跃期。直到 2015 年初活跃度才出现明显下降。各轨道的 SEU 变化曲线,在 2010 年 SEU 变化波动较大,整体值要高于之后的其他年。

为了使太阳活动和单粒子翻转之间的关系得到更加细致的体现,分别统计计算 3 个轨道面上仪器的日均单粒子翻转数,得到同一轨道面上所有仪器的平均值。如图 4 所示,分别给出不同轨道上日均单粒子翻转数在不同年份的数值。可以看出 700 和 1 100 km 轨道上的仪器在 2010 年的日均 SEU 最多,之后的 5 年呈逐年下降的趋势,即太阳平静期相较活跃期更容易发生单粒子翻转,这与美国 TDRS-1 上观测到的 SEU 数据相吻合^[10],而 500 km 轨道上情况正好相反,平静期的日均翻转率最低,但是其在 2010 年的观测数据只有 4 个月。

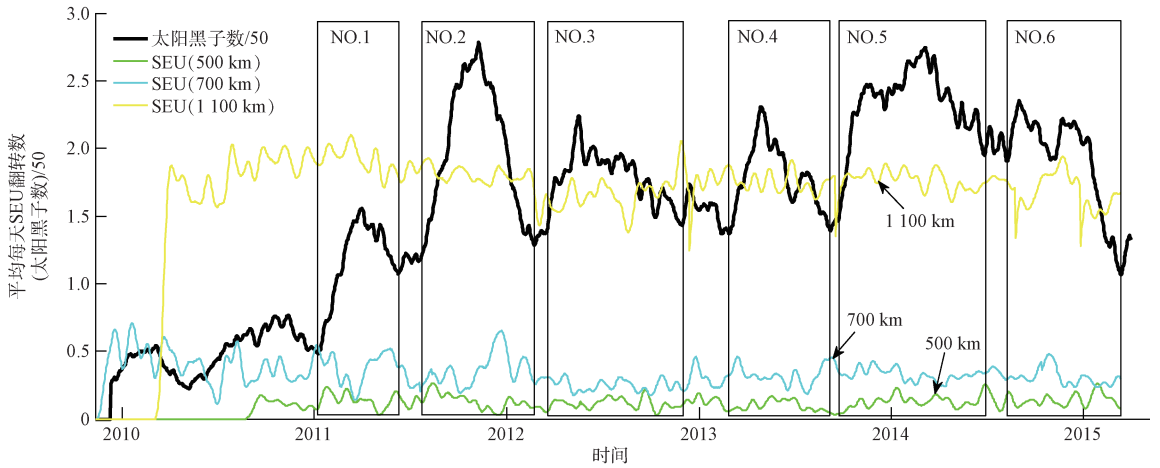


图 3 太阳黑子变化与 3 个轨道上日均 SEU 变化

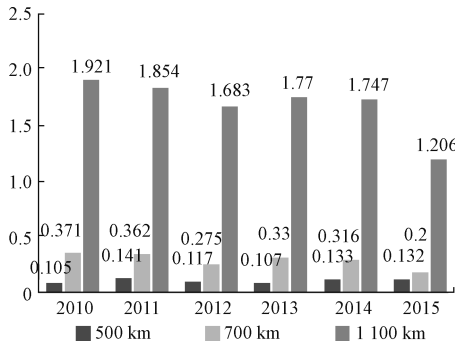


图 4 3 个轨道每年的 SEU 日均翻转数

3.2 相关性分析

太阳黑子数变化曲线进入活跃期后出现了多次起伏变化,存在多个峰值,并且每个峰值高度不同、持续时间各异,也不具有清晰的周期性,因此,按照曲线变化趋势粗略将所观测区间加入如图 5 所示的 6 个时间窗,将其划分成 6 个单独的观测区间。此外,各个轨道上的日均 SEU 变化曲线和太阳黑子数变化曲线从宏观上来看不能明确的观测出二者变化规律的关系,这里通过计算两组数据协方差来计算二者的相关系数。计算公式如下:

$$R = \text{Cov}(x, y) / \sqrt{\text{Cov}X, X \text{Cov}(X, Y)} \quad (2)$$

式中: X 和 Y 分别为太黑子数和日均 SEU 数矩阵。

2011 年为太阳活动上升年,此时太阳活动的加剧势必引起近地空间环境的变化,是本次研究中的重要时间观测区间。2011 年太阳黑子数曲线共出现了两次上升和峰值,按照划分好的目标区域分别计算了太阳黑子数与 SEU 数的相关系数。其中区域 1 和区域 2 如图 5 所示,横坐标为日均 SEU 数的延迟时间,由于每个时间窗口的跨度为 100~300 d,黑子曲线相邻两峰间隔约为 200 d,故选择可观测的延迟时间范围为 200 d,纵坐标为不同延迟时间对应的的相关系数。

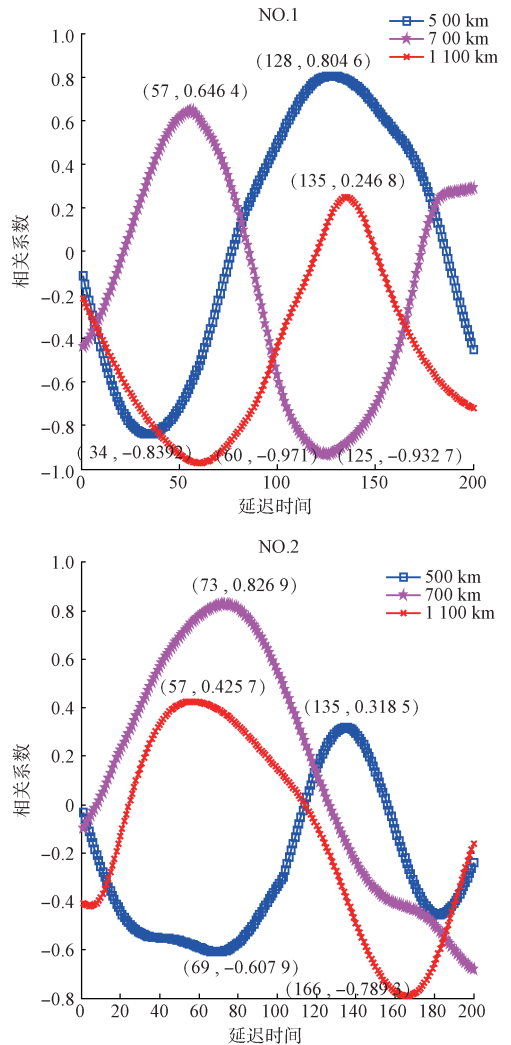


图 5 3 个轨道面 SEU 数与太阳黑子数的相关系数

图 5 中各轨道上 SEU 与太阳黑子数变化的相关系数在经过一个较长的时间延迟后会达到最大峰值,最大值甚

至可以达到 0.8 以上。但两个观测区域中不同轨道出现最大相关系数所对应的延迟时间各不相同,并且同一轨道在

两个观测区域内所呈现的延迟时间也不同。按此法对全部 6 个观测区域求相关系数得表 1。

表 1 SEU 与太阳黑子数最大相关系数表

	NO. 1		NO. 2		NO. 3		NO. 4		NO. 5		NO. 6	
	延迟 天数	最大相 关系数	延迟 天数	最大相 关系数	延迟 天数	最大相 关系数	延迟 天数	最大相 关系数	延迟 天数	最大相 关系数	延迟 天数	最大相 关系数
500 km	128	0.8046	135	0.3185	82	0.399	23	0.8887	159	0.1034	44	0.6204
700 km	57	0.6464	73	0.8269	200	0.2393	200	0.5618	133	0.07398	17	0.7119
1 100 km	135	0.2468	57	0.4257	165	0.03214	23	0.6546	109	-0.049	56	0.6886

在各个观测区域呈现出的最大相关系数及所对应延迟时间均有所不同,在 6 个观测时间窗内,500 km 轨道上达到了 2 次高度相关和 1 次显著相关,700 km 轨道上达到了 1 次高度相关和 2 次显著相关,1 100 km 轨道上达到了 2 次显著相关。也有一些情况在 200 d 的延迟中没有得到理想的相关系数,如 NO. 3 和 NO. 4 中的 700 km 轨道 SEU 数据。也有部分数据相关性较低,如 NO. 3 和 NO. 5 整体相关系数较小。但超过数据都在假设的延迟时间范围内得到了较大的最大相关系数值,NO. 1 和 NO. 4 的 500 km 以及 NO. 2 的 700 km 轨道上均得到了超过 0.8 的较强相关系数,其中最大值甚至达到了 0.888 7,这表明太阳黑子数变化与单粒子翻转之间有极大可能存在着正相关,这种相关关系可能是经过一段时间的延迟后才能表现出来。

在每个观测区域内,各轨道相关系数较大时所对应的延迟天数较为接近,如 NO. 2 的 700 km 轨道的 73 d 和 1 100 km 轨道的 57 d,NO. 4 的 500 km 和 1 100 km 轨道同为 23 d,以及 NO. 6 的 500 km 轨道的 44 d 和 1 100 km 轨道的 56 d。从这些数据能够看出日均 SEU 翻转数与太阳黑子数变化曲线上存在着一个较为明显的延迟关系,虽然不同观测区域以及不同轨道所对应的延迟时间不同,但是同一个观测区域内具有较大相关系数的轨道所对应的延迟时间较为接近。

500 km 轨道上相关系数最大值出现了两次大于 0.8 的值,700 km 上有一次大于 0.8 和一次大于 0.7 的值,1 100 km 轨道上只出现了两次大于 0.6 的值。这些数据表明,较低轨道上的单粒子翻转与太阳黑子数量变化的相关性更高。

在分析中存在相关系数较小的情况,NO. 3 和 NO. 5 两个观测区域均不理想,其原因可能来自于所选区域数据本身,黑子变化曲线波峰较小且持续时间较长,太阳活动变化较缓,空间仪器 SEU 变化响应较弱。此外,本文只考虑了最大延迟时间为 200 d 之内的延迟,故不排除存在更大延迟时间的可能。

4 结 论

本文分析了 2010 年~2015 年期间来自 3 个轨道面上不同相位的 48 个空间仪器的单粒子翻转数与太阳黑子数变化之间的关系。采用统计分析的方法计算了不同轨道面上日均 SEU 数,通过计算日均 SEU 数变化曲线与太阳黑子数变化曲线的相关性分析二者间的关系,得到了以下结论。

近地轨道上单粒子翻转与太阳活跃程度整体上呈负相关关系,空间仪器在太阳平静期比活跃期时更容易发生单粒子翻转。这说明在太阳平静期空间仪器的抗单粒子效应可靠性受到了更大的挑战,单粒子翻转也可能受到了其他因素的影响,如在平静期较为活跃的银河宇宙射线,在后续的研究中将对银河宇宙射线与单粒子翻转的相关性进行分析。这为分析单粒子翻转的影响因素提供了参考。

太阳黑子变化曲线与单粒子翻转变化曲线呈现出较强的相关性,当单粒子翻转曲线在时间上做适当延时后会与太阳黑子数变化曲线达到较大的相关系数,并且低轨道空间仪器所在轨道高度越低,相关性越大。这说明太阳活动能够引起低轨道空间仪器单粒子翻转的变化,并且这一调制过程存在着一个较长的延迟时间。这个长时间的延时可能是太阳风对近地空间高能粒子演化所需时间,延时的存在能够提前预测太阳活动可能带来的影响,为航天器做出合理的单粒子威胁规避措施提供反应时间。

这些发现对空间仪器单粒子翻转的预测、抗辐射加固方案的设计以及航天器的发射时间选择等有着极大参考价值。可以通过对太阳活动变化的观测对空间仪器在未来一段时间内的单粒子翻转率进行预测,以此评估仪器在空间环境中的可靠性,从而通过设计应对的加固方案(如短时开启防护程序、局部待机等)规避空间辐射风险。还可根据评估结果为准备发射的航天器选择合理的发射时间,减少由于太阳活动扰动而带来的风险。

(下转第 31 页)