

低轨互联网卫星在轨单粒子翻转分析及防护措施

尚琳^{1,2}, 刘晓娜^{1,2}, 曹彩霞^{1,2}, 李国通^{1,2}, 朱野^{1,2}

(1. 上海微小卫星工程中心; 2. 中国科学院 微小卫星创新研究院: 上海 201203)

摘要: 空间单粒子翻转 (SEU) 对于在轨卫星寿命和可靠性有着较大的影响, 然而, 针对低轨互联网卫星 1000~1200 km 的典型极地轨道空间 SEU, 目前缺少在轨试验验证结果。文章对某型号的两颗卫星在轨 7 个月以来的 SEU 事件记录数据进行处理和分析, 给出互联网卫星 1050~1425 km 不同轨道高度上的 SEU 事件发生的频度、区域及概率, 结合在轨运行情况提出互联网卫星在轨单粒子翻转的软硬件防护设计措施。数据表明, 在当前低轨互联网卫星的典型轨道高度上, 对于抗单粒子翻转阈值为 $0.7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的低阈值 SRAM 器件, 在轨 SEU 事件大部分发生在 SAA 区域, 发生概率约为 $7.63 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。结合卫星在轨空间防护设计经验, 通过加强元器件选用控制、软硬件冗余设计、关键器件限流等措施, 可以有效提高低轨互联网卫星的在轨可靠性。

关键词: 单粒子翻转; 低轨互联网卫星; 在轨防护; 冗余设计

中图分类号: V474.2; V520.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2021)05-0503-05

DOI: [10.12126/see.2021.05.002](https://doi.org/10.12126/see.2021.05.002)

Analysis of in-orbit single event upset of low-Earth-orbit internet satellite and protection measures

SHANG Lin^{1,2}, LIU Xiaona^{1,2}, CAO Caixia^{1,2}, LI Guotong^{1,2}, ZHU Ye^{1,2}

(1. Shanghai Engineering Center for Microsatellites;

2. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences: Shanghai 201203, China)

Abstract: The single event upset (SEU) of low-Earth-orbit (LEO) satellites has a great impact on the lifetime and the reliability of the in-orbit satellites. But the in-orbit verification results are few for the SEU of the internet satellite at a typical polar orbit altitude in the range of 1000 km to 1200 km. This paper analyzes and processes the SEU record data of the two satellites in-orbit for seven months, and gives the frequency, the area and the orbital heights of SEUs at different orbital altitudes from 1050 km to 1425 km for the internet satellites. It is shown that the probability of the in-orbit SEU for the onboard SRAM is about $7.63 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, and most in-orbit single event upsets occur in the South Atlantic Anomaly (SAA) area. And it is shown that the reliability of the LEO internet in-orbit satellites can be effectively improved by strengthening the control of the component selection, the software and hardware redundancy design and the current limiting of the key components.

Keywords: single event upset; LEO internet satellite; in-orbit protection; redundancy design

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 上海市科委科技创新行动计划项目 (编号: 17DZ1100700)

引用格式: 尚琳, 刘晓娜, 曹彩霞, 等. 低轨互联网卫星在轨单粒子翻转分析及防护措施[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(5): 503-507

SHANG L, LIU X N, CAO C X, et al. Analysis of in-orbit single event upset of low-Earth-orbit internet satellite and protection measures[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(5): 503-507

0 引言

近年来,随着卫星技术、电子技术和新材料技术的迅猛发展,国内外纷纷提出包含几千至数万颗低轨卫星的互联网星座建设计划,如美国的 StarLink、OneWeb 和我国的“虹云”“鸿雁”等卫星星座系统。这些卫星互联网星座系统大部分采用轨道高度 1000~1200 km、轨道倾角 85°~90°的极地轨道。

低轨卫星在轨运行中不可避免地受到复杂空间环境影响,卫星元器件性能会不同程度地出现退化甚至损毁^[1],其中单粒子事件对于在轨卫星有较大影响。针对低轨卫星在轨单粒子效应问题,国内外学者采用在轨单粒子事件记录^[2]、地面加速辐照试验^[3-4]和模型计算分析^[5]等手段开展了大量研究工作,但试验数据大多针对 500~800 km 的太阳同步轨道^[6-7],针对互联网卫星典型轨道高度(1000~1200 km)的极地轨道缺少在轨试验验证结果。

本文对某型号两颗卫星在轨 7 个月以来的单粒子事件记录数据进行分析和处理,给出互联网卫星极地轨道不同轨道高度(1050~1425 km)上单粒子翻转(SEU)事件发生的频度、区域及概率,结合卫星在轨运行情况,提出互联网卫星在轨单粒子软硬件防护措施。

1 卫星运行轨道及器件参数

某型号 A、B 两颗卫星于 2019 年 11 月成功发射,A 星运行于入轨轨道高度 1050 km 的圆轨道;B 星入轨轨道为近地点 1050 km、远地点 1425 km 的椭圆轨道,入轨 3 个月后实施轨控进入轨道高度 1050 km 的圆轨道。两颗卫星具体的运行轨道参数见表 1。

表 1 A、B 两星运行轨道参数

Table 1 In-orbit parameters of the two satellites

轨道参数	A星	B星	
		轨控前	轨控后
近地点高度/km	1050*	1050	1050*
远地点高度/km		1425	
轨道倾角/(°)	89	89	89
轨道周期/min	106.2	110.3	106.2

注:*圆轨道高度。

该型号 A、B 两颗卫星的星载计算机架构如图 1 所示,采用宇航级芯片 AT697F 作为主处理器,支持 Flash、SRAM、SDRAM 和 I/O 映射空间的

访问,且直接集成 SRAM EDAC 算法,可对 SRAM 存储器进行检二纠一校验。AT697F 外围配置 2 片 3D PLUS 公司 3DSR20M40VS2708 SRAM 存储器,CPU 读取 SRAM 数据发现位翻转错误时,可通过 EDAC 进行校正并记录位翻转事件次数和发生时间,并将数据遥测传送至地面进行相关分析。

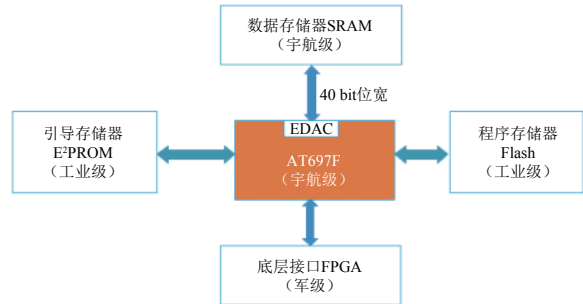


图 1 该型号 A、B 两星的星载计算机架构
Fig. 1 The onboard computer architecture of the two satellites

该 SRAM 芯片材料为 Si,工作电压 3.3 V,存储容量 2×20 Mbit(单片容量 20 Mbit)。根据芯片使用手册,该 SRAM 存储器的空间辐照相关指标如下:

- 1)抗总剂量(TID)能力: ≥100 krad(Si);
- 2)抗单粒子锁定(SEL)阈值: 110 MeV·cm²/mg;
- 3)抗单粒子翻转(SEU)阈值: 0.7 MeV·cm²/mg。

2 在轨 SEU 事件数据统计及分析

2.1 卫星在轨 SEU 事件数据统计

对 A、B 两颗卫星从 2019 年 11 月—2020 年 6 月的在轨 SEU 事件进行统计,结果如图 2 所示。

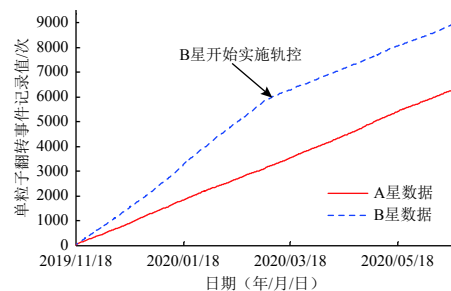


图 2 A、B 两星在轨 SEU 事件发生频度统计
Fig. 2 Frequency statistics of single event upsets of the two satellites

从图中可以看出,A 星在轨道高度 1050 km、轨道倾角 89°的极地圆轨道的 SEU 发生频度约为 32 次/d,即 $7.63 \times 10^{-7} \text{ bit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,B 星在近地点 1050 km、远地点 1425 km、轨道倾角 89°的极地椭圆轨道的 SEU 发生频度约为 60 次/d,即 $1.43 \times 10^{-6} \text{ bit}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。B 星于 2020 年 3 月轨控进入 1050 km 极地圆轨道之后的 SEU 发生频度与 A 星相近。

2.2 在轨 SEU 发生区域分析

南大西洋异常区(SAA)位于南美洲东侧南大西洋区域,涉及纬度范围 15°N~55°S、经度范围 15°E~90°W^[8],其内磁场强度仅约为同纬度正常区的一半,使得空间高能带电粒子环境分布改变,对于低轨卫星在轨单粒子锁定、翻转有较大影响。

对 A、B 两颗卫星在轨 SEU 发生的星下点位置进行统计,结果如图 3 和图 4 所示,可以看出,除了中高纬度区域零星发生的 SEU 事件外, A 星和 B 星的在轨 SEU 大部分发生在 SAA 区域,统计结果见表 2。

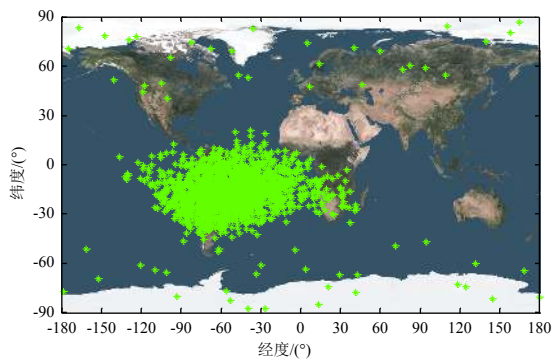


图 3 A 星在轨 SEU 发生的星下点位置统计

Fig. 3 Statistics of the sub-satellite points of in-orbit single event upsets of satellite A

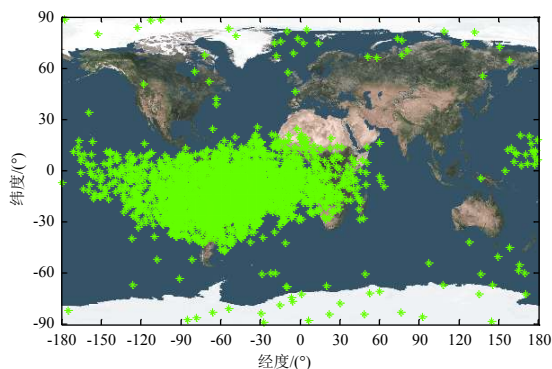


图 4 B 星(轨控前)在轨 SEU 发生的星下点位置统计

Fig. 4 Statistics of the sub-satellite points of in-orbit single event upsets of satellite B

表 2 A、B 两星在轨 SEU 事件中 SAA 区域及中高纬度地区的占比统计

Table 2 Statistics of the ratios of SEU in SAA region and mid-high latitude regions of the two satellites

卫星	SAA 区域 SEU 占比/%	中高纬度地区 SEU 占比/%
A 星	95.9	3.5
B 星(轨控前)	94.9	4.3

注: A 星经度范围 45°E~120°W, B 星经度范围 60°E~175°W。

2.3 不同轨道高度空间环境分析

对 B 星在实施轨控前运行于近地点 1050 km、远地点 1425 km 的椭圆轨道时发生的近 6000 次 SEU 进行统计分析,按照发生 SEU 时的卫星轨道高度进行分类的结果如表 3 所示。从表中数据可以看出,有约 66.2% 的 SEU 发生在 1250 km 以上的轨道高度,特别是 1350 km 以上发生的 SEU 占事件总数的 41.4%;轨道高度 1050~1150 km 与 1150~1250 km 内 SEU 发生的数量相当,均远少于 1250 km 以上高度的,说明此轨道高度空间环境相对温和。

表 3 B 星不同轨道高度发生 SEU 的事件总数占比统计

Table 3 Statistics of the ratios of single event upsets at different orbital altitudes of satellite B

飞行高度/km	所发生 SEU 在事件总数中的占比/%
1050~1150	17.1
1150~1250	16.7
1250~1350	24.8
1350~1425	41.4

B 星在 2020 年 3 月完成了轨道控制,轨道远地点高度(平根数)由 1430.0 km 下降至 1067.7 km。对变轨过程中随卫星轨道高度降低发生的 SEU 进行统计分析,结果如图 5 所示。

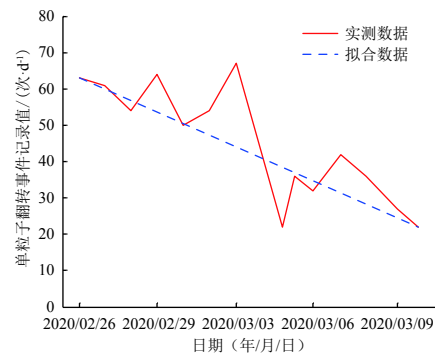


图 5 B 星轨控过程中 SEU 发生频度统计

Fig. 5 Frequency of single event upsets during the orbit maneuver of satellite B

从图中可以看出,在轨道高度下降过程中,SEU 发生的频度也逐步下降,与表 3 统计结果趋势一致。

3 轨道空间辐射通量及器件翻转概率仿真计算

3.1 轨道空间辐射通量计算

采用 AP-8 质子辐射模型和 CREME96 GCR 重离子辐射模型对 A 星和 B 星(轨控前)空间辐射环境进行仿真,器件等效屏蔽厚度设为 3 mm(Al)。

图6和图7分别给出两颗卫星运行轨道的质子能谱和质子、重离子LET值谱。从图6可以看出, A、B两星运行轨道的空间质子辐射最大能量超过100 MeV, B星运行轨道的质子辐射平均积分通量较A星运行轨道的大2~3倍。从图7可以看出, A、B两星运行轨道的空间重离子辐射对卫星的影响主要在 高能谱段, 且两个轨道上的空间重离子能谱值比较接近。

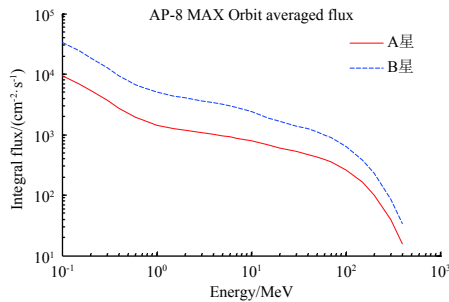


图6 A、B两星在轨质子平均辐射积分通量
Fig. 6 Averaged proton fluxes of the two satellites

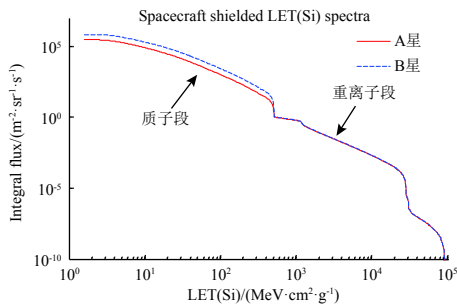


图7 A、B两星在轨质子和重离子平均LET(Si)积分通量
Fig. 7 Average LET(Si) proton and heavy ion fluxes of the two satellites

3.2 SRAM 器件在轨单粒子翻转概率仿真

从器件手册中仅能查询到该星载SRAM芯片抗SEU阈值为 $0.7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 无法获取芯片的高能质子和重离子模型参数, 且没有地面辐照模拟试验相关数据。为了能够与在轨实测数据进行比较分析, 参考ESA的空间环境信息系统(SPENVIS)中存储容量与该芯片相近的SAMSUNG 16M(3.3 V)和HITACHI 16M(3.3 V)器件的重离子Weibull模型和质子Bendel模型相关参数, 并结合该芯片抗单粒子阈值参数进行修改。首先修改仿真参数以尽量匹配A星在轨SEU事件发生概率, 再利用相同的参数仿真B星(轨控前)在轨SEU的发生概率。

仿真选用的重离子Weibull模型和质子Bendel模型参数如下:

1) 等效辐射灵敏体积: $3.14 \mu\text{m}\times 3.14 \mu\text{m}\times 0.10 \mu\text{m}$;

2) 重离子Weibull模型参数: $S=4.11$, $L_0=0.70 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, $W=7.90 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, $\sigma_{\text{lim}}=1.50\times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{bit}$;

3) 质子Bendel模型参数: $A=1.18 \text{ MeV}$, $B=0.92 \text{ MeV}$ 。

表4给出A、B两颗卫星运行轨道上高能质子引起的SEU概率仿真结果, 从表中数据可以看出仿真结果与2.1节B星(轨控前)在轨SEU发生概率统计结果仅有2%~3%的偏差, 且重离子单粒子翻转占比与2.2节中高纬度地区SEU发生概率统计结果也相近, 表明该组仿真参数对该SRAM器件有较好的适应性。

表4 A、B两星在轨质子、重离子单粒子翻转概率预测
Table 4 Probability prediction of proton and heavy ion single event upset in the orbit for the two satellites

卫星	质子SEU 概率/(bit ⁻¹ ·s ⁻¹)	重离子SEU 概率/(bit ⁻¹ ·s ⁻¹)	重离子SEU 占比/%
A星	7.39×10^{-7}	3.15×10^{-8}	4.1
B星 (轨控前)	1.74×10^{-6}	7.65×10^{-8}	4.2

4 低轨互联网卫星单粒子防护措施

该型号A、B两颗卫星在设计时选用了大量工业级、军级的低成本元器件, 部分元器件缺少抗辐照指标, 因此针对低等级SRAM、Flash、SRAM型FPGA及重要CPU器件采取了许多软硬件防护设计。两星发射入轨以来, 各单机工作状态正常。结合该型号卫星抗单粒子效应软硬件防护设计经验, 归纳低轨互联网卫星提高可靠性的主要措施^[9]包括:

1) 加强元器件选用控制, 对于不能确定抗SEL和SEL阈值(或饱和截面)参数的器件, 特别是低等级元器件, 须在地面通过辐照试验进行测定;

2) 通过EDAC电路加强SRAM器件的抗SEU能力, 如该型号A、B两颗卫星的EDAC电路可以有效检测出SRAM在轨的2位翻转、纠正1位翻转(目前该型号卫星所用SRAM在轨出现的均为1位翻转, 通过EDAC电路校正可以保证器件正常工作);

3) 通过重要电路和数据三模冗余、代码定时刷新等手段纠正在轨SEU错误, 如该型号A、B两颗卫星载荷采用SRAM型FPGA器件, 软件代码在

Flash 中三模冗余且具备定时刷新功能,可以保证载荷的正常工作;

4)对于 Flash 存储器件,可以通过存储校验、按比特位或字节 3 取 2 等软件手段,检测和纠正轨道单粒子错误,该型号 A、B 两颗卫星的星载计算机实时对 Flash 器件存储的代码及重要数据进行校验,可以及时发现和处理在轨出现的单粒子翻转事件;

5)通过对重要 DC-DC、CPU 芯片增加限流措施等设计,可以有效避免器件在轨发生单粒子锁定时电流过大造成卫星功能失效;

6)通过星载计算机软件对卫星平台和载荷重要单机进行自主健康管理,在单机发生单粒子翻转、单粒子锁定引起通信异常、数据错误等问题时,单机可及时实施自主恢复。

5 结束语

根据某型号 A、B 两颗卫星在轨 7 个月以来的 SRAM 器件 SEU 记录数据分析结果显示,当前低轨互联网卫星典型的 1000~1200 km 高度运行轨道,对于抗 SEU 阈值为 $0.7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的低阈值 SRAM 器件,在轨 SEU 大部分发生在 SAA 区域,发生概率约 $7.63\times 10^{-7} \text{ bit}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。结合该型号卫星在轨空间防护设计经验,通过加强元器件选用控制、软硬件冗余设计、关键器件限流等措施,可以有效提高低轨互联网卫星在轨的可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 吕高见. CAST968 平台小卫星在轨故障分析和建议[J]. *空间控制技术与应用*, 2015, 41(5): 57-62
LÜ G J. On-orbit failure statistical analysis and suggestions for small satellites of CAST968 platform[J]. *Aerospace Control and Application*, 2015, 41(5): 57-62
- [2] 袁斌, 张坤毅, 张斌全, 等. 空间粒子辐射 LET 谱的中低轨道卫星实测结果及误差分析[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(2): 334-339
YUAN B, ZHANG S Y, ZHANG B Q, et al. Analysis of space particle radiation LET spectra detecting result in MEO/LEO and its error[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(2): 334-339
- [3] 张付强, 郭刚, 覃英参, 等. 质子单粒子效应引发卫星典型轨道下 SRAM 在轨错误率分析[J]. *航天器环境工程*, 2018, 35(4): 365-370
ZHANG F Q, GUO G, QIN Y C, et al. Prediction of proton-induced single event effect on SRAM's in-orbit soft error rate on typical satellite orbit[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(4): 365-370
- [4] HE W, WANG Y K, XING K F, et al. Single event effect vulnerability analysis and on-orbit error rate prediction[C]//2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2016
- [5] 张战刚, 雷志锋, 恩云飞. 典型卫星轨道辐射环境及在轨软错误率预计模型分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(9): 215-221
ZHANG Z G, LEI Z F, EN Y F. Radiation environment of typical satellite orbits and on-orbit soft error rate prediction model analysis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(9): 215-221
- [6] LI J, CHOUTKO V, XIAO L. Single event upset analysis: on-orbit performance of the alpha magnetic spectrometer digital signal processor memory aboard the international space station[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2018, 885: 98-104
- [7] 李强, 李会锋, 孙先伟, 等. 近地卫星长期 SEU 事件退火分析[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 458-468
LI Q, LI H F, SUN X W, et al. Annealing analysis to long term SEUs for LEO satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 458-468
- [8] 楼建设. 卫星用典型 SRAM 存储器空间辐射效应及模拟试验方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 11-12
- [9] 周飞, 李强, 信太林, 等. 空间辐射环境引起在轨卫星故障分析与加固对策[J]. *航天器环境工程*, 2012, 29(4): 392-396
ZHOU F, LI Q, XIN T L, et al. Analysis and countermeasures of in-orbit satellite failures caused by space radiation environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(4): 392-396

(编辑: 闫德葵)

一作简介: 尚琳(1987—), 男, 博士学位, 副研究员, 从事卫星总体设计、导航卫星精密定轨、低轨通信卫星星座系统等研究。E-mail: shangl@microsat.com。