

基于差频检测技术的高速 AD 单粒子翻转评估方法研究

彭惠薪, 李哲, 郑宏超, 于春青

(北京微电子技术研究所, 北京 100076)

摘要: 本文基于差频检测的原理, 提出一种在高频动态输入模式下, 对高速高精度模数转换器(AD)的抗单粒子翻转效应进行评估的测试方法, 并以一款 8 位 3 GSPS 高速 AD 为测试对象, 设计开发了一套高速 AD 单粒子翻转效应测试系统, 对目标器件进行了重离子试验。通过对试验结果的图像和错误数据进行分析, 评估参试器件的抗辐照性能参数, 为抗辐照高速高精度 AD 的加固设计提供数据支撑。

关键词: 高速 AD; 差频; 单粒子翻转; 敏感性分析

中图分类号: TP302.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)05-0857-06

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0739

SEU Characterization of High-speed Analog-to-digital Converter Based on Beat Frequency

PENG Huixin, LI Zhe, ZHENG Hongchao, YU Chunqing

(Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: A single event upset (SEU) effect test method using a beat frequency to test the high-speed analog-to-digital converter (AD) with a high frequency dynamic input was proposed. The test method was demonstrated on a 8 bit 3 GPSP AD using different types and energy of heavy ions with a SEU effect test system. By the analysis of the test figure and the error data, the parameter of device can be calculated, providing basis and guidance for high-speed AD's radiation harden design.

Key words: high-speed AD; beat frequency; single event upset; sensitivity analysis

模数转换器(AD)作为连接模拟信号和数字信号的桥梁,在电子系统中占有越来越重要的地位。在航天系统中,AD的性能对设备在辐射环境中能否正常工作有很大影响,因此航天器系统中的AD必须具备一定的抗辐照能力。随着抗辐照AD的速度、精度、性能等各方面明显提升,如何对高速高精度AD的单粒子

效应进行全面测试成为急需解决的问题,而高速高精度AD电路的单粒子翻转效应测试是其中的难点。目前,国内外对于高速高精度AD电路单粒子翻转效应测试方法进行了一定的研究^[1-3]。Kruckmeyer等^[4-5]提出目前空间用通信设施的传输带宽需求已达1GSPS,甚至更高,输入信号已进入奈坤斯特第2或第3区间,

收稿日期:2019-10-08;修回日期:2020-02-21

作者简介:彭惠薪(1991—),女,黑龙江哈尔滨人,工程师,硕士,从事抗辐照加固验证技术、嵌入式测试系统研究

网络出版时间:2020-03-16;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200313.1712.005.html>

对于这些高速的数据转换,输出数据的监控和抓取变得非常复杂。而以往 AD 电路的单粒子翻转效应测试常采用静态输入的方法,不能完整体现电路在应用时的运行状态。为了更为准确地反映高速 AD 的抗单粒子翻转效应能力,应在测试时为其提供高频动态输入,且在对器件单通道输出进行采样时发现,动态输入模式下,器件表现出更多的单粒子翻转错误。

本文基于差频检测的原理设计一套应用于高速高精度 AD 的单粒子翻转效应测试系统,为保证采集数据的完整性,基于低压差分信号(LVDS)串并转换的数据采集模块设计实现多通道的数据采集^[6-7],并利用差分功耗分析(DPA)对时钟和数据进行相位校准^[8-10],增加数据采集的可靠性。在重离子辐照环境下,以一款 8 位 3 GSPS 的 AD 为目标器件,对测试系统进行试验验证。

1 基于差频检测的单粒子翻转效应测试方法

1.1 差频检测原理

差频检测是指输入信号频率接近 2 倍的奈奎斯特频率,由于输入信号的频率非常接近采样时钟的频率,则会发生混叠现象,这时 AD 的输出将会是一个很缓慢的正弦波。当输出采样点间差值为 1 LSB(最低有效位)时,输入信号频率为:

$$f_{in} = f_s / (2^N \pi)$$

其中: f_{in} 为输入信号频率; f_s 为采样频率; N 为 ADC 的位分辨率。

图 1 为差频测试示意图。当采样频率为 1 GHz、输入信号为 998.76 MHz 时,则输出 1.24 MHz 的缓慢正弦波。由于动态信号具有较高的频率,所以在 AD 的输入模块部分施加了更大的压力,因而更易在电路的模拟部分产生更长的瞬态脉冲。

在差频测试时应当保证 AD 的输出在每个

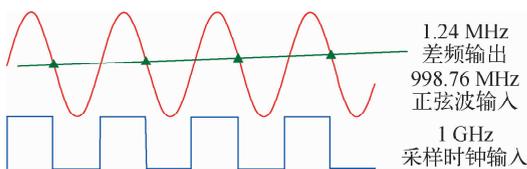


图 1 差频测试示意图

Fig. 1 Schematic of beat frequency test

时钟周期的变化尽量小,若输出的变化很大,由于单粒子翻转引起的输出变化很小,则错误检测软件会检测不到。因此应使 AD 的输出变化小于最小分辨率,才能监测到更精确的单粒子翻转错误(图 2)。

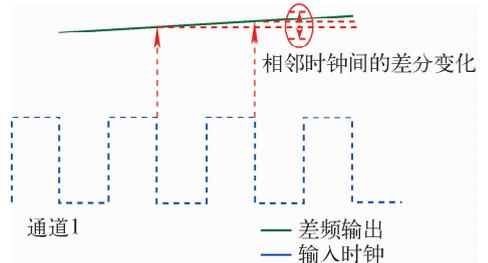


图 2 AD 在差频测试下的输出

Fig. 2 Output of AD under beat frequency test

1.2 单粒子翻转效应判据

在对待测高速数字电路进行单粒子翻转测试时,一般用位单粒子翻转截面(单位为 $\mu\text{m}^2/\text{bit}$)描述器件单粒子效应特性,但在 AD 电路中利用位翻转来描述无意义,因为在 AD 中每位的值会根据输出数据的不同不断变化。

AD 单粒子翻转效应主要表现为可恢复的多次或单次转换错误。对高速 AD 的单粒子翻转效应进行判别时,应实时监测 AD 输出值,判断其输出值和预期值是否存在瞬时的、可自行恢复的偏差,且偏差的大小是否超过了可接受的范围。在差频检测的方法中,具体的判别方法是利用现场可编程门阵列(FPGA)将高速 AD 的不同位输出还原为 1 个数值,比较前后两个值的差值,若差值超过所设定的阈值,且在短时间内差值可恢复到阈值内,则认为参试器件发生了 1 次单粒子翻转错误。触发阈值的设定需综合考虑参试器件的性能和系统噪声的影响。

2 高速 AD 单粒子翻转效应测试方法

参试器件是一款抗辐照 8 位 3 GSPS 高速 AD,采用单电源 1.9 V 供电,典型功耗为 1.9 W。器件采用高速模数转换电路以及数字自校准技术,保证器件的高速度和高动态特性。器件内部集成串行接口,支持用户控制单数据速率(SDR)、双数据速率(DDR)等多种工作模式。

在对高速 AD 进行单粒子翻转效应测试时,利用信号源产生 749 MHz 的正弦信号输入至 AD,FPGA 以 750 Msps 采样率进行采集,由于发生频谱混叠,利用软件程序设计的方法将采集得到的 AD 输出还原为 1 MHz 正弦信号。对比相邻采样点数值,若相差大于设定阈值(综合考虑参试器件性能和本底噪声的影响,阈值设置为 7 LSB),则认为发生单粒子事件。

为对发生单粒子错误的混叠波形进行完整还原,选用深度为 4 096 的 FIFO 对采集到的输出数据进行缓存,以保证至少还原出 3 个周期的混叠波形。通过设置触发方式,将发生单粒子错误前 2 045 个点及出错后 2 046

个点打包上传至上位机,可使还原出的错误波形位于中间位置,便于后期数据处理时对单粒子翻转效应类型的分析与判读。此外,上位机会对单粒子翻转个数进行初步识别和统计,并将出错波形的数据及图象存储在指定位置。

3 系统设计

3.1 硬件设计

超高速 AD 的单粒子翻转效应测试系统主要包括电源供电模块、输入信号模块、FPGA 控制和采集模块、人机交互和串口通信模块、示波器监测模块、错误监测统计和上传模块。其硬件结构如图 3 所示。

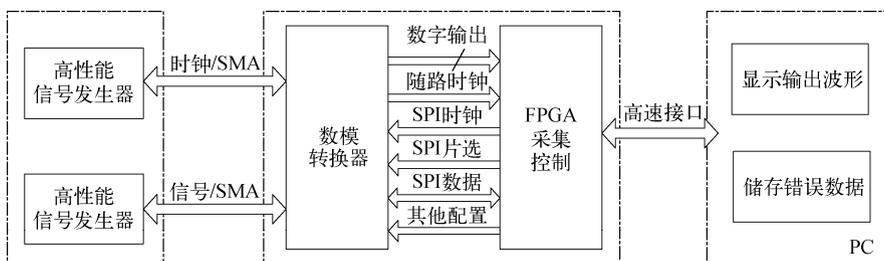


图 3 高速 AD 电路单粒子翻转效应测试系统
Fig. 3 SEU effect test system of high-speed AD

为保证高速 AD 处于良好的高频工作状态,在电源设置上选用纹波较小的低压差线性稳压电源供电。通过 FPGA 实现对 AD 电路的控制和输出数据的采集,将 AD 的输出数据接口、SPI 接口及其他控制接口同 FPGA 相连。根据 AD 不同的输出形式,在 FPGA 建立数据接收模块对输出数据进行采集和缓存,然后进行输出数据单粒子翻转的判读。

高速 AD 内部既含有模拟集成电路,又存在数字集成电路,所以当离子辐射到其内部时,可能会产生较为复杂的单粒子效应。对于 AD 而言,单粒子翻转效应主要表现为输出码值的偏离。因此单粒子翻转效应检测方法的设计要点之一是实现对 AD 输出信号的完整采样。基于差频检测的原理,测试系统将以 750 Msps 的采集率对输出数据进行采集,为保证输出数据采样完整,利用 LVDS 串并转换及 DPA 相位校准,对多通道高速输出数据进行降频处理。

图 4 为 LVDS 收发处理,LVDS 接收器输出时钟设定为输入时钟 8 分频,接收端每个通

道锁定独立时钟相位,通过位对齐操作将数据并行输出。上传数据时需从并行数据中恢复出每个字节。750/8 分频的输出时钟,将 8 个时钟沿采集的 128 bit 数据存储在宽度为 128、数组长度为 128 字节的二维 FIFO 中,还原成 8 个时钟时刻的单字节数据。

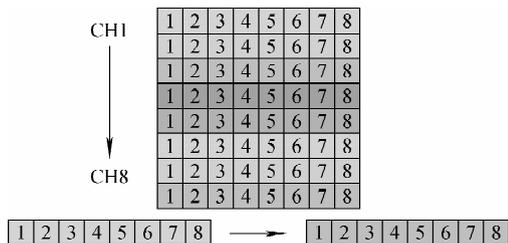


图 4 LVDS 收发处理

Fig. 4 Receiving and transmitting process of LVDS

为保证数据传输的完整性,测试系统使用 FIFO 存储器在异步转换、串行通信中对数据进行缓存^[11-13],它主要使用在数据接口部分,用于存储与缓冲两个异步时钟之间的数据,并可

在两个不同时钟系统之间快速而方便地传输实时数据,实现对错误数据的缓存和上传。

测试系统采用两个 FIFO 存储器模块, FIFO 的写时钟为 AD 的随路时钟经过延时得到,其中 FIFO_1 主要实现错误波形的捕获,根据单粒子事件的触发条件将 FIFO 控制在半满状态,当发生单粒子错误时,将检测到的错误捕获,并将前后的数据通过串行数据端口发送给上位机;FIFO_2 主要实现实时波形的显示,该模块在写满和读空之间循环执行,持续的通过串行接口模块向上位机发送数据。

FIFO_1 的错误数据的缓存方式如图 5 所示,当未出现错误时,使 FIFO_1 始终处于半满状态,写入和读出速度相等,当检测到单粒子翻转错误时,FIFO_1 开始关闭读出,当 FIFO_1 写满后将整个数据上传。选用 FIFO_1 宽度为 64 bit、深度为 4 096,由写入到读出会有 5 个周期延时,因此当检测到 FIFO_1 满时还有 5 个数据未进入,因此最终总共上传数为 4 091。

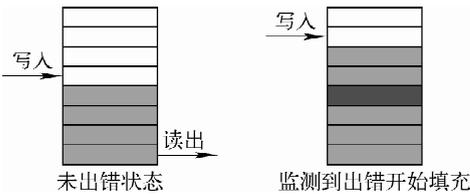


图 5 错误数据缓存

Fig. 5 Error data caching

3.2 软件设计

软件设计的主要目的是实现对单粒子翻转效应测试系统的控制,及对单粒子效应错误类型进行预判并统计错误数。

单粒子翻转效应检测软件界面如图 6 所示,数据采集与处理系统采用 RS232 电平进行数据传输,利用数据处理软件对 AD 输出的差频信号进行波形还原,将数字输出图形成,用于观测输出数据明显的失真,对采集到的错误在幅值和持续时间上进行分类统计。测试系统采用两个窗口对待测高速 AD 输出的实时波形与出错波形进行显示,并对发生错误的波形图像及错误数进行保存。

单粒子翻转效应测试系统的控制主要利用硬件编程的方法控制 FPGA 为待测芯片提供

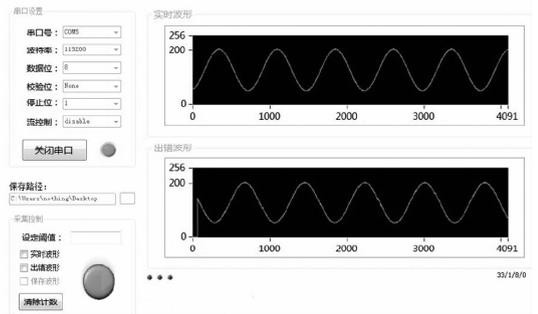


图 6 串行通信和实时波形显示

Fig. 6 Serial communication and display of real-time waveform

使能信号,为待测 AD 进行 SPI 读写配置,以保障待测高速 AD 处于正常的模数转换工作状态,采集待测高速 AD 的输出并将其还原成字,通过比对相邻输出点的 LSB 差值的大小判断器件是否发生单粒子效应。软件设计流程如图 7 所示。其流程为:1) 上电初始化配置,使待测高速 AD 器件进入正常工作模式,设置输入信号和时钟,控制 AD 电路进行模数转换;2) 利用 FPGA 对输出数据进行采集,并将输出的二进制码转化为 10 进制,通过数据采集与

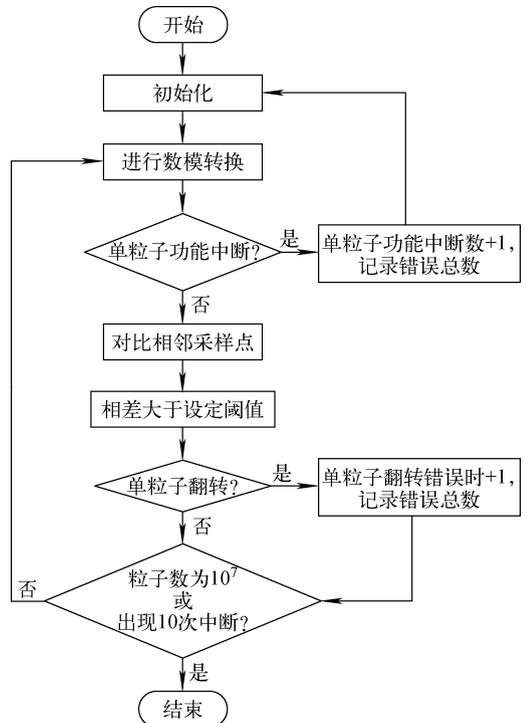


图 7 软件设计流程

Fig. 7 Software design flow

单粒子效应检测软件将输出还原为正弦波,若信号发生明显的畸变和失真,并在长时钟周期内不能恢复,则认为待测 AD 发生了单粒子功能中断;3) 若未发生单粒子功能中断,则比较连续两个输出的差值,若差值大于设定的阈值,则认为发生了单粒子翻转,统计错误总数并保存发生错误的波形;4) 当辐照离子总数达到 10^7 cm^{-2} ,或单粒子中断错误数达到 10 次,则停止辐照试验。

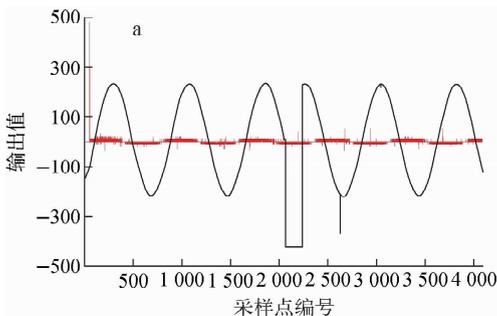
4 结果与分析

参试器件进行重离子辐照试验,试验用重离子能量及其 LET 值列于表 1。

表 1 试验用重离子能量及其 LET 值
Table 1 Energy and LET of ions in test

离子	能量/ MeV	LET 值/(MeV· $\text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$)	射程/ μm
Al	120	8.6	50.0
Cl	138	13.8	38.9
Ti	150	22.5	31.0
Ge	210	37.4	30.0
Ta	1 400.8	81.4	83.3

对于待测高速 AD 发生单粒子效应类型的判断主要依靠于对 AD 发生单粒子错误时出错波形的分析。在重离子试验过程中,待测器件的错误波形主要有中断和翻转错误波形两种形式



(图 8)。图 8 中横坐标为采样点编号 0~4 091,纵坐标为各采样点还原得到的数字输出值,黑色线为还原出的待测 AD 输出,红色线为两相邻输出点的 LSB 差值。由图 8a 可看出,在被重离子辐照期间,待测高速 AD 的差频输出发生较大失真,因此判断待测器件发生了单粒子中断效应;在单粒子中断效应发生后的波形中存在一瞬时的尖峰,此错误很有可能被判别为单粒子翻转错误,但由于中断发生后的波形已与之前的波形有明显的相位差别,因而此类错误不应再单独记为单粒子效应错误,而应统一归为 1 次单粒子中断错误并对测试系统进行初始化。发生此类单粒子中断效应很可能是因为待测高速 AD 中内部的数据寄存器发生或传递了单粒子翻转,导致在锁相环等区域出现输出异常。

由图 8b 可知,器件在重离子辐照期间,输出未发生波形失真或畸变,但在某一时刻待测器件两相邻输出点之间的 LSB 差值超出了所设定的阈值,因此判断待测器件发生单粒子翻转效应。造成待测高速 AD 发生单粒子翻转效应的成因很多,芯片内部的基准电路、锁相环、高速 LVDS 数据接收、混频开关电路和电流源阵列若受到重离子辐照影响,均有可能造成待测器件发生翻转。综合处理数据结果可得到参试器件单粒子翻转错误截面与 LET 之间的威布尔曲线^[14-15],如图 9 所示(纵坐标已做归一化处理)。

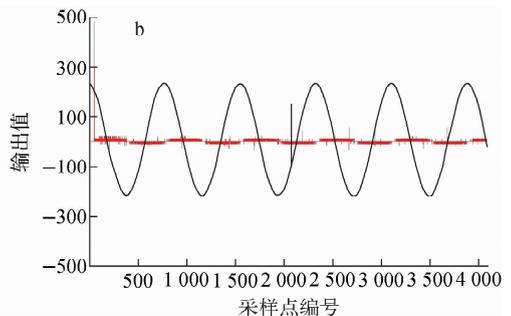


图 8 单粒子中断(a)和翻转(b)错误波形图

Fig. 8 Error waves of single event function interrupt (a) and upset (b)

5 结论

本文基于差频检测原理,提出一种以高频动态输入的模式,对高速 AD 抗辐照性能进行评价的方法,并基于 LVDS 串并转换数据采集模块,对器件多通道输出进行采集,还原了输出的混叠波形,并对单粒子效应类型进行预判和统计,开发了

一套针对高速 AD 单粒子翻转效应测试系统。

应用该单粒子翻转效应测试系统,对某款高速 AD 进行了重离子试验。通过对试验结果图像和数据的分析,对待测高速 AD 的抗辐照性能进行了评估。通过分析出错图形和数据,可对其发生的单粒子效应类型进行甄别,并对

其发生单粒子效应的内部敏感单元进行初步定位,为高速 AD 的抗辐照设计提供建议。

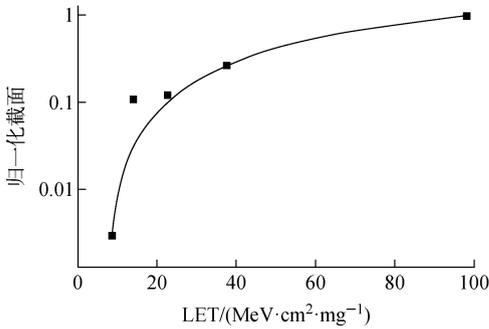


图9 高速 AD 单粒子翻转效应错误截面

Fig. 9 SEU effect error cross-section of high-speed AD

参考文献:

- [1] 刘小敏,姜慧强,王志宇,等. 星载数模转换器抗辐射性能评估测量系统研制[J]. 核技术, 2016, 39(11): 110401.
LIU Xiaomin, JIANG Huiqiang, WANG Zhiyu, et al. Development of radiation tolerance evaluation and measurement system for spaceborne D/A converter[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(11): 110401(in Chinese).
- [2] 刘玉辉. 数模转换电路空间辐射效应测试技术研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2017.
- [3] BERG M, BUCHNER S, KIM H, et al. Enhancing observability of signal composition response and error signatures during dynamic SEE analog to digital device testing[C]// Radiation and Its Effects on Components and Systems. Deauville: IEEE, 2009.
- [4] KRUCKMEYER K, RENNIE R L, OSTENBERG D H, et al. Single event upset characterization of GHz analog to digital converters with dynamic inputs using a beat frequency test method [C]// 2007 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Honolulu: IEEE, 2007.
- [5] KRUCKMEYER K, TRINH T. Single event effects characterization of texas instruments ADC12D1600CCMLS, 12 bit, 3.2 GSPS analog-to-digital converter with static and dynamic inputs[C]// 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Paris: IEEE, 2014.
- [6] 李哲,郑宏超,边强. 一种 JESD204B 协议高速发送器单粒子错误率的测试系统及方法:中国, 109639457A[P]. 2019-04-16.
- [7] 程洪涛,赵冬青,储成群,等. 基于 LVDS 的高速数据存储系统优化设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(5): 74-77, 99.
CHENG Hongtao, ZHAO Dongqing, CHU Chengqun, et al. Optimized design of high speed data storage system based on LVDS[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(5): 74-77, 99(in Chinese).
- [8] 吴继华,蔡海宁,王诚. Altera FPGA/CPLD 设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2012.
- [9] 于暄,肇云波. 基于 FPGA 高速数据采集的解决方案[J]. 现代电子技术, 2007, 30(5): 145-148, 151.
YU Xuan, ZHAO Yunbo. High speed data acquisition based on FPGA[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(5): 145-148, 151(in Chinese).
- [10] 黄颖,崔小欣,魏为,等. 基于 FPGA 平台的电路级抗差功耗分析研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2014, 50(4): 652-656.
HUANG Ying, CUI Xiaoxin, WEI Wei, et al. Research on DPA resistant circuit for FPGA[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(4): 652-656(in Chinese).
- [11] 黄凡. 一种基于 FPGA 的异步 FIFO 设计方法[J]. 微处理机, 2017, 38(1): 23-26, 32.
HUANG Fan. Design of asynchronous FIFO based on FPGA[J]. Microprocessors, 2017, 38(1): 23-26, 32(in Chinese).
- [12] 吕达,张加宏,李敏,等. 基于 FPGA 的多通道 FIFO 存储控制器的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(4): 1-4, 9.
LÜ Da, ZHANG Jiahong, LI Min, et al. Design and implementation of multi-channel FIFO memory controller based on FPGA[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(4): 1-4, 9(in Chinese).
- [13] 吴居娟. 基于 FPGA 的多路高速数据采集系统的设计[J]. 电子世界, 2019(2): 54-57.
WU Jujuan. Design of high speed multichannel data gathering system based on FPGA[J]. Electronics World, 2019(2): 54-57(in Chinese).
- [14] DELAUS M, COMBS W. Total-dose and SEU results for the AD8001, a high-performance commercial op-amp fabricated in a dielectrically-isolated, complementary-bipolar process[C]// 1994 Radiation Effects Data Workshop. Tucson: IEEE, 1994.
- [15] 耿超. 基于 RPP 模型的单粒子在轨翻转率计算[C]//第二十四届全国空间探测学术交流会论文摘要集. 西安:中国空间科学学会, 2011.