

基于 VHDL-AMS 的模数转换器辐射效应 建模与仿真方法

梁 博, 刘锦辉*, 张晓鹏, 谭雯丹, 张馨丹, 刘 刚

(西安电子科技大学计算机科学与技术学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 是连接模拟信号域与数字信号域的关键器件, 而现有研究缺乏 ADC 辐照效应建模的相关内容. 为满足大型模数混合信号系统辐照效应建模仿真的需要, 本文提出了建立具有辐照效应的 ADC 行为级模型的方法. 首先根据 ADC 的工作原理将其拆解为不同的通用模块, 使用模拟和混合信号硬件描述语言 (Very High speed integrated circuit hardware Description Language for Analog and Mixed Signals, VHDL-AMS) 建立了各模块的行为级模型. 接着根据基本原理将各模块动态组合为未辐照情况下基本的 ADC 模型. 对于 ADC 的辐照效应, 通过开展辐照试验, 测量了 ADC 芯片 HWD7710 和 SAD9434 受总剂量 (Total Ionizing Dose, TID) 效应和中子辐射 (Neutron Radiation, NR) 效应影响的工作参数, 并利用最小二乘法拟合获得 ADC 的工作参数与辐照剂量的关系式. 最后根据辐照关系式, 在基本模型上添加辐照参数模块, 并建立两种不同结构 ADC 的 TID 与 NR 模型. 通过仿真结果与试验数据对比, 验证了所建 ADC 辐射效应模型的普适性和精度. 模型的静态参数仿真结果与试验结果的相对偏差在 5% 以内, 证明该方法支持对不同 ADC 及不同辐射效应进行辐照效应模型建模.

关键词: 模数转换器; 建模方法; 总剂量效应; 中子辐射效应; 静态参数; 动态参数

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室专项基金 (No. SKLIPR2011)

中图分类号: TN402; TP39

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2706-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221049

Modeling and Simulation Method of Radiation Effect of Analog-to-Digital Converter Based on VHDL-AMS

LIANG Bo, LIU Jin-hui*, ZHANG Xiao-peng, TAN Wen-dan, ZHANG Xin-dan, LIU Gang

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The analog-to-digital converter (ADC), a key component bridging the analog and digital signal domains, is critical to the interface between these domains. However, existing research falls short in providing comprehensive models that take into account radiation effects on ADCs. To address the demands of simulating radiation effects in large-scale mixed-signal systems, this paper presents a method for developing behavioral-level models of ADCs that embody radiation effects. The paper begins by dividing the ADC into its constituent generic modules based on its working principles, and establishing behavioral models for each module using the very high speed integrated circuit hardware description language for analog and mixed signals (VHDL-AMS). These modules are then dynamically assembled according to fundamental principles to form the baseline ADC model under non-irradiated conditions. To address the radiation effects on ADCs, irradiation experiments were conducted to quantify the performance parameters of two ADC chips, HWD7710 and SAD9434, under total ionizing dose (TID) and neutron radiation (NR) exposure. The operating parameters affected by these radiation effects were meticulously measured. Least squares regression was then used to derive equations correlating the functional parameters of the ADC with radiation dose. Finally, TID and NR models for two different structured ADCs were developed by incorporating radiation parameter modules into the basic model based on the radiation relation equations. The universality and accuracy of the constructed ADC radiation effect model was verified by comparing the simulated results with experimental

data. The relative deviation between the static parameter simulation results and the experimental results was within 5%. The results show that this method supports the modeling of radiation effects for various ADCs and multiple radiation effects.

Key words: analog to digital converter; modeling method; total ionizing dose effect; neutron radiation effect; static parameters; dynamic parameters

Foundation Item(s): Special Foundation of the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (No.SKLIPIR2011)

1 引言

模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)的功能是将幅度在时间上连续变化的模拟信号转换为时间上离散、幅值上量化的等效数字信号,在信号处理系统中是必不可少的器件.传统的电路系统抗辐照能力评估和加固过程通常采用“设计-制造-试验”的迭代方法,通过实际辐照验证系统工作状况.但是对于包含 ADC 在内的大规模模数信号混合系统而言,这种方法的验证周期长且成本极高.

而使用包含 ADC 辐照模型在内的系统级模型,建立目标电路系统整体辐照模型,使用仿真验证方法,可以在更低成本和短周期的前提下,探寻系统在不同辐照环境下的工作状况和薄弱环节,为系统的辐照效应研究和整体加固提供理论支持.但针对辐射环境下的 ADC 工作状态,ADC 生产商往往不会专门测试和提供相应模型.出于辐照环境下模数混合信号系统建模与仿真的需要,本文提出一种使用 VHDL-AMS 的 ADC 辐照效应模型建模方法.

对于 ADC 的建模仿真,国内外学者进行了大量的研究工作.文献[1]提出了使用 Verilog-AMS 结合 System Verilog 对闪存 ADC 进行实数模型行为级建模,并将其与晶体管级 SPICE 模型对比,证明了行为级建模相比之下具有更短的运行时间,然而,文中采用的 ADC 模型行为级建模没有对各个模块进行更精确的建模.文献[2~5]研究了 Σ - Δ 型 ADC 关键模块的建模和功能参数的仿真的不同方面,其中文献[2]基于 Σ - Δ 调制原理,采用 System Verilog 实现了一阶 Σ - Δ 型 ADC 实数模型的行为级建模,并具有较高的仿真精度.该论文中将 ADC 分解为多个功能模块,采用分别建模并组合的方法,对于 ADC 的建模具有重要参考意义.文献[3]实现了 VHDL-AMS 中带通 Σ - Δ 调制器行为模型的精细建模,该模型考虑了大部分影响组件性能的非理想因素,例如采样抖动、kT/C 噪声和运算放大器参数.论文中建立了二阶带通 Σ - Δ 调制器,并仿真计算了模型信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)和信噪失真比(Signal-to-Noise-and-Distortion Ratio, SNDR)以及一些非线性误差,例如微分非线性(Differential Non Linear, DNL)和积分非线性(Integral Non Linear, INL),对 ADC 的建模和误差仿真也有重要参考价值.然而,上述文献提出的建模方法仅针对 Σ - Δ 型 ADC,不适

用于其他类型的 ADC 建模.文献[6~11]研究了逐次逼近型 ADC 参数建模与参数仿真的相关内容,其中文献[9]针对逐次逼近型 ADC 建模,研究了单调式数模转换器与比较器模块的建模方法,建立了 ADC 的行为级模型,并与 SPICE 模型作了比较.然而,上述研究均是针对特定类型 ADC 进行建模仿真,实际应用过程中会受到 AD 转换器结构的约束而不具有通用性.文献[12]在数字器件建模的基础上提出了一种数字集成电路的通用的行为级建模方法(Function and Input/output Buffer information Specification, FuncIBS),既可以用来描述数字器件的逻辑功能,又能刻画其输出端口的辐射效应电气特性.且此方法从器件顶层行为级出发建模,不涉及物理底层.遗憾的是文章只针对纯数字器件建模,对于 ADC 这样的数模混合器件没有提出解决方案.文献[13]提出了一种基于 VHDL-AMS 的 ADC 建模方法,该方法不依赖于器件的具体工艺参数,理论上可以对任何 ADC 器件缓冲区进行建模,然而文献并没有研究对辐照条件下 ADC 数字端口输出缓冲区进行建模.文献[14]设计了一款片上系统(System on Chip, SoC)控制方案的单粒子辐照试验检测系统,用于监控高可靠 ADC 器件单粒子辐射效应的试验现象和评估抗单粒子辐射能力,但该文献没有根据测试结果对 ADC 器件的单粒子辐射效应进行合理建模.

国内外关于 ADC 建模和辐照效应领域的研究有许多成果,但仍缺乏建立适用于辐照环境仿真的通用型 ADC 模型的方法.本文结合 VHDL-AMS 混合建模语言和 FuncIBS 数字端口建模方法,以文献[12]和文献[13]的建模方法为基础,建立了不针对特定类型与型号的通用 ADC 模型.然后结合 ADC 的辐照效应测试,提出了建立 ADC 的辐照效应仿真模型的方法,并进行了模型仿真与实际器件的辐照效应试验结果对比.试验结果表明,使用本文提出的方法,对不同种类 ADC、不同辐照效应进行辐照效应模型建模,得到的模型在不同辐照环境参数下仿真结果与实际测试结果相近,关键参数误差在 5% 以内,证明了本文提出方法可以对不同辐照环境下不同 ADC 进行建模.

2 基本原理

2.1 ADC 工作原理

由于 ADC 转换每次需要一定的转换时间,因此模

拟信号输入后,首先在采样保持电路以固定时间间隔进行采样,这个时间间隔称为采样周期,每次采样后的取样值在下个采样周期到来前保持不变,用于ADC的实际转换,该过程称为采样保持.然后由后续电路对采样值进行量化和数字化编码,即每个采样结束后,转换器选择与采样保持电平最接近的量化电平,并用二进制数字来表示该量化电平,完成转换.

图1所示为逐次采样型ADC信号转换模块的基本工作流程.建立ADC模型的目的一就是表征ADC各项性能指标,所以在建模之前,了解ADC各项参数的意义对整个芯片的设计和使用都十分必要,ADC参数一般可分为静态参数和动态参数两大类.

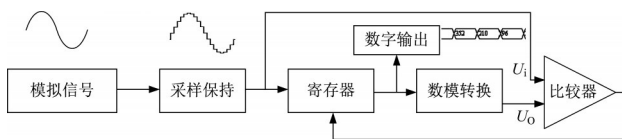


图1 逐次采样型ADC转换原理

本文中测量的主要静态参数包括:偏移误差(Offset error, Off_error)、满刻度误差(Full-Scale error, FS_er-

ror)、DNL与INL.

另外,通过对试验结果及仿真结果数据进行统计与快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)等操作,可以计算出ADC运行时的各项动态参数,本文通过输入正弦信号作为有效信号,测量的动态参数包括:SNR、SNDR、无杂散动态范围(Spurious-Free Dynamic Range, SFDR)与有效位数(Effective Number Of Bits, ENOB).

2.2 ADC辐射效应

VHDL-AMS在VHDL的基础上,针对模拟和混合信号进行了扩展,建立了统一的规则.VHDL-AMS允许用户通过构建方程、数学函数或事件驱动等方式进行建模,具有高度灵活性,易于通过试验数据建立辐照效应模型;同时VHDL-AMS便于对数字器件VHDL模型进行扩展及建立IBIS(Input/output Buffer Information Specification)模型,在复杂模型的实际中可实现代码复用.相比VerilogA与HSPICE等其他硬件建模语言,VHDL-AMS支持混合信号器件建模仿真,且能方便地对整个系统建模,几种常见的建模语言对比如表1所示.基于上述原因,本文选择VHDL-AMS进行ADC辐照效应建模仿真.

表1 几种建模语言的对比

	VHDL-AMS	VerilogA	HSPICE
优点	支持混合模拟建模;支持系统级建模;支持可重用性.	语言简洁,学习曲线相对平缓;支持时序行为的建模;可以方便地与其他设计工具集成.	能够进行高精度的电路仿真;可以进行特定器件的模拟分析;可以模拟数字和模拟信号.
缺点	语法复杂,学习曲线较陡峭;语言规范较多,需要掌握多种不同的语法结构.	不支持混合模拟建模;不适合描述数字电路;不适合多物理域的系统建模.	不支持混合模拟建模;仿真速度较慢.

ADC是一个具有模拟输入和数字输出的模数混合器件.目前ADC的生产工艺主要有双极互补金属氧化物半导体(Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor, BiCMOS)和双极金属氧化物半导体(Bipolar Metal Oxide Semiconductor, BiMOS)等,并非单一的双极型器件或MOS器件,其辐射损伤机理也极大不同于一般的模拟器件和数字器件.通常,ADC的数字部分采用CMOS工艺制造,而模拟部分为双极工艺或其他混合线性工艺,电离辐射效应中的总剂量(Total Ionizing Dose, TID)效应对MOS器件的影响很大;而对于双极器件,其主要辐射损伤来自中子辐射(Neutron Radiation, NR)引起的位移效应.因此,对于ADC器件而言,TID效应和NR效应都是研究的重点.

2.2.1 TID辐射

从双极器件电离辐射损伤机理来看,ADC参数退化与功能失效都是辐射感生氧化物正电荷和SiO₂-Si界面态增加的结果.

TID效应是量带电对电路的长期累效应,在电离射环境中,带电粒子射入电子电路中,会与其中MOS器件

中的栅介质作用,在SiO₂绝缘层中产生陷并在Si-SiO₂界面引入界面电荷,导致MOS器件发生电压漂移、跨导降低、迁移率下降等,从而引起集成电路的整体性能参数显著变化,甚至功能失效^[15].

随着时间的累积,TID效应能够导致器件电学特性缓慢退化,从而导致电路整体性能下降甚至失效.随着CMOS工艺的进步,浅槽隔离(Shallow Trench Isolation, STI)区域会形成一个侧向的寄生晶体管,在TID辐射条件下,STI区仍然能够捕获电荷,引起器件电学特性发生改变(如压漂、漏电流增加、1/f噪声增加),从而导致晶体管直流和交流特性变化,影响ADC的静态和动态参数,如稳定性和SNDR等^[15,16].

2.2.2 NR辐射

双极型晶体管的特性与非平衡少数载流子密切相关,而NR效应会缩短少数载流子寿命,这是影响双极型器件特性的主要因素.该效应导致的性能变化包括:二极管正向压降增大,反向漏电流增大;晶体管电流增益降低,饱和压降增大.此外,载流子去除效应对高压器件的正向压降和大电流特性有严重影响.

由于模数转换器是模数混合器件,其数字部分由 CMOS 工艺制造而成,而模拟部分常是由双极工艺或其他线性工艺混合,其模拟部分对于 NR 效应较为敏感.高注量的 NR 将使其中的部分关键单元,如 S/H、基准源、残差放大器、锁存比较器等漏电流显著增加,晶体管增益降低,导致 ADC 性能参数的退化,同时增加的漏电流将破坏这些单元电路的平衡工作点,进而导致转换结果出现误码或失码^[17,18].

3 ADC 建模方法

本文所建立 ADC 模型的完整构架如图 2 所示.本文将 ADC 的基本功能进行拆解,忽略不同类型 ADC 物理结构的不同,在更高层次建立 ADC 行为级模型,本建模方法对 ADC 基本行为进行拆解,将其主要划分为采样保持行为、噪声引入行为和模数转换行为,旨在建立 ADC 关键参数与 ADC 关键行为的关系,在 ADC 各项行为中反映不同 ADC 的关键参数.本方法在原理上忽略了不同种类 ADC 器件的实际结构,而对采样能力、噪声

情况、模数转换能力等通用结构进行建模,具有更好的普适性.

基于上述思想,在建立 ADC 模型的基础上,结合辐照效应试验,收集了两种不同结构高性能 ADC (SAD9434 和 HWD7710) 的常态数据及不同辐照条件下的关键参数退化数据,并使用本文提出的方法对 ADC 的参数退化行为进行建模,建立辐照效应模型,随后通过试验与仿真结果对比,验证了本方法的可行性与普适性.

根据 ADC 基本行为划分,分别建立采样保持模块、噪声模块、加法器模块和 AD 转换模块,组合为常态下 ADC 功能模型,该建模方法从原理上忽略了 ADC 模型具体物理结构,具有更大的适用范围.为建立 ADC 辐照效应模型与测试各项性能参数,额外添加辐照剂量转换模块,正弦信号生成模块,以及各阶段波形存储显示模块.为计算 ADC 动态参数性能,需要将存储波形数据导入 Matlab 进行 FFT 变换,进而计算动态参数.

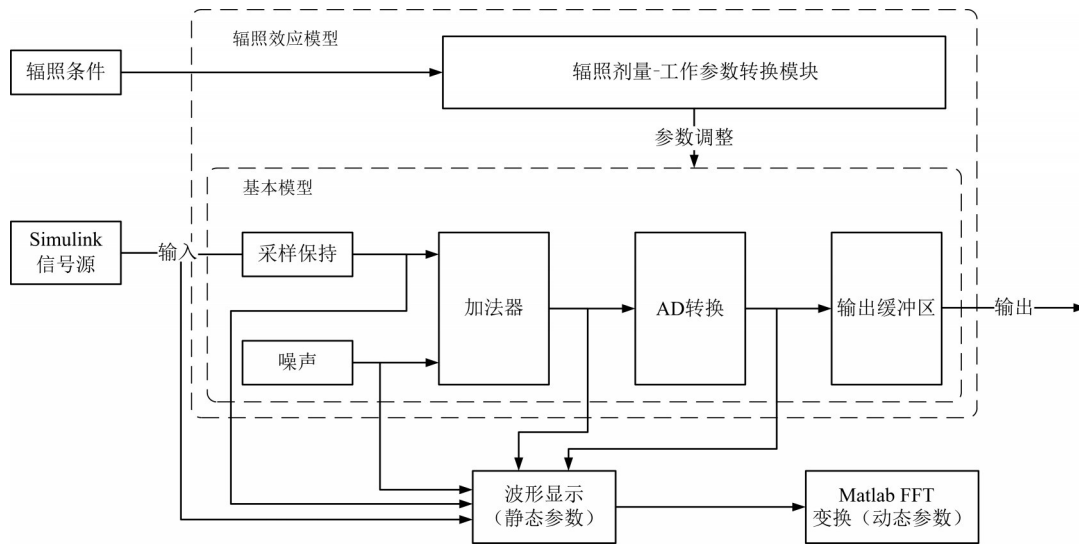


图 2 ADC 辐射效应模型架构

3.1 基本模块建模

基本模块包括采样保持模块、噪声模块、加法器模块和 AD 转换模块.

采样保持模块的作用是对输入来的模拟信号按固定时间采样并保持到下一采样时刻.采样模块的 VHDL-AMS 伪代码如算法 1 所示,其中 T 表示采样周期设定值,ZOH 为间隔采样的等效函数^[13].

噪声模块作用是产生 ADC 在转换过程中的量化误差、时钟抖动、电源波动以及非线性等误差带来的噪声,本文采用均匀分布模拟 ADC 模型的器件噪声,并支持通过参数 left 和 right 设置噪声上下限^[13].其 VHDL-AMS 形式的伪代码如算法 2 所示.

算法 1 采样保持模块功能算法

输入: 模拟信号 ain

输出: 采样信号 aout

1. GENERIC (T : REAL := 1×10^6) //属性定义(采样时间)
2. PORT(TERMINAL ain : ELECTROCAL //输入端口定义)
3. TERMINAL aout : ELECTROCAL //输出端口定义)
4. QUANTITY v_1 ACROSS ain TO ELECTRICAL_REF //量的申明
5. QUANTITY v_2 ACROSS i THROUGH aout TO ELECTRICAL_REF //量的申明
6. $v_2 = v_1 \text{ZOH}(T, 0.0)$ //采样表达式

加法器模块的作用就是把采样保持输出的信号和噪声信号线性叠加传送到下一级,其结构如图 3 所示.

算法2 噪声生成模块功能算法

输入: 噪声信号 x

输出: 区间变量 left,right

1. PROCEDURE MyUniform(VARIABLE seed1,seed2:INOUT POSITIVE; VARIABLE left,right : INOUT REAL; VARIABLE x : OUT REAL) IS --进程定义
2. Uniform(seed1,seed2,rand) //均匀分布
3. $x := (\text{left} - \text{right}) \times (\text{rand} + \text{right})$ //区间转换

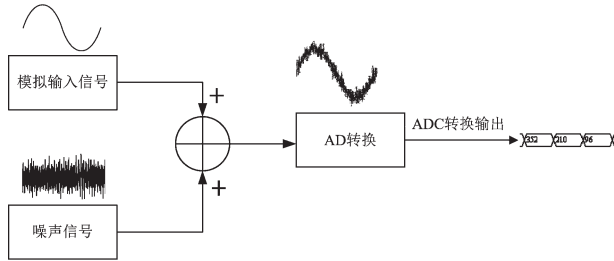


图3 加法器结构

AD转换模块是该模型的核心,其核心功能依赖于模拟数据的量化,同时也包含了类型转换和上下限定等处理.转换模块工作流程如图4所示.

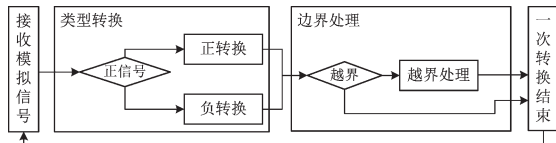


图4 ADC转换流程

AD转换模块基本功能的VHDL-AMS伪代码如算法3所示.

3.2 辐射效应建模

辐照参数转换模块的主要功能是根据用户设定的环境中辐照剂量参数,计算出该条件下ADC模型中明显受辐照效应影响的参数的数值,然后相应改变ADC模型的参数.

对于物理层面的器件与参数,可以通过辐照效应作用机理来直接推导出模型参数与辐照剂量的关系,并得出其函数表达式.但是,对于数字系统行为级建模而言,很难通过辐照效应的作用机理去推导数字器件的功能参数.因此,本文通过实际测量的方式,测量不同辐照条件下ADC的工作参数,然后通过最小二乘法等近似拟合的方法获取辐照剂量与工作参数的关系表达式,之后根据实际设计需求,设计辐照效应参数相关函数,从而设计出辐照效应转换模块.

最小二乘法即采用如式(1)所示的一般多项式对目标函数进行拟合,为达到最好效果,需要找到一组 $\theta(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$,使得 $\sum_{i=1}^n (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2$ (残差平方和)

算法3 AD转换模块基本功能算法

输入: 模拟信号 input

输出: 数字输出 dout_vec,整型输出 dout_integer,回转比较 aout

1. GENERIC(Nbits:INTEGER:=12 //转换位数,定义属性
2. V_{\max} :VOLTAGE:=0.74 //最大参考电压
3. T_{smp} :TIME:=0.05 μs //转换周期
4. Off_error:REAL:=0.0 //偏移误差
5. FS_error:REAL:=1.0 //满刻度误差(1.0表示无误差)
6. PORT(TERMINAL input //模拟输入信号,定义端口
7. SIGNAL dout_vec //数字输出
8. SIGNAL dout_integer //整型输出
9. TERMINAL aout //回转,以做比较
10. QUANTITY v_{in} ACROSS i_{in} THROUGH input TO ELECTRICAL_REF //量的申明
11. QUANTITY v_{out} ACROSS i_{out} THROUGH aout TO ELECTRICAL_REF //量的申明
12. CONSTANT fs_bit_weight:INTEGER:=2**Nbits-1 //常量定义
13. CONSTANT lsb:INTEGER:= V_{\max} /REAL(fs_bit_weight) //常量定义
14. SIGNAL $v_{\text{out_sig}}$:REAL:=0.0 //信号定义
15. VARIABLE tmp:REAL:=0.0 //变量定义
16. WAIT FOR T_{smp}
17. $\text{tmp} := \text{REAL}(v_{\text{in}} + \text{offset}) / (\text{lsb} * \text{FS_error})$
18. IF $\text{tmp} \geq \text{REAL}(\text{fs_bit_weight} + 1)$ THEN
19. $\text{tmp} := \text{REAL}(\text{fs_bit_weight})$
20. END IF
21. IF $\text{tmp} < 0.0$ THEN
22. $\text{tmp} := 0.0$
23. END IF
24. $v_{\text{out_sig}} \leq \text{tmp}$
25. $v_{\text{in}} == v_{\text{in}}$
26. $\text{dout_integer} \leq \text{INTEGER}(v_{\text{out_sig}})$
27. $\text{dout_dec} \leq \text{CONV_STD_LOGIC_VECTOR}(\text{dout_integer}, \text{Nbits})$
28. $v_{\text{out}} == \text{REAL}(\text{CONV_INTEGER}(\text{dout_vec})) ** \text{lsb}$

最小,即求 $\min \sum_{i=1}^n (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2$.

$$h_{\theta}(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \dots + \theta_n x^n \quad (1)$$

常用最小二乘法解法使用矩阵法求解,式(1)的矩阵表达形式为式(2):

$$h_{\theta}(x) = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} \quad (2)$$

其中,假设函数 $h_{\theta}(x)$ 为 $m \times 1$ 向量, $\boldsymbol{\theta}$ 为 $n \times 1$ 向量, \mathbf{X} 为 $m \times n$ 维矩阵, m 代表样本个数, n 代表样本特征数. 定义损失函数如式(3)所示:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} (\mathbf{X}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{Y})^T (\mathbf{X}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{Y}) \quad (3)$$

其中, \mathbf{Y} 是样本的输出矩阵,维度为 $m \times 1$. 根据最小二乘法原理,使用损失函数 $J(\boldsymbol{\theta})$ 对变量 $\boldsymbol{\theta}$ 求导,结果如式(4)

所示:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} J(\theta) = X^T(X\theta - Y) = 0 \quad (4)$$

对式(4)求导结果整理后可得式(5),通过求解该式即可得到目标二项式参数 $\theta(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$.

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

本文对两种 ADC 分别在两种不找辐照条件下 ADC 的工作参数进行了测量,由于辐照试验周期较长,在不同条件下分别选择了 3 个测试剂量点,根据测试数据,对辐照剂量与工作参数的关系表达式进行拟合,其中, SAD9434 与 HWD7710 的 TID 效应 Off_error 参数拟合结果如图 5 和图 6 所示.

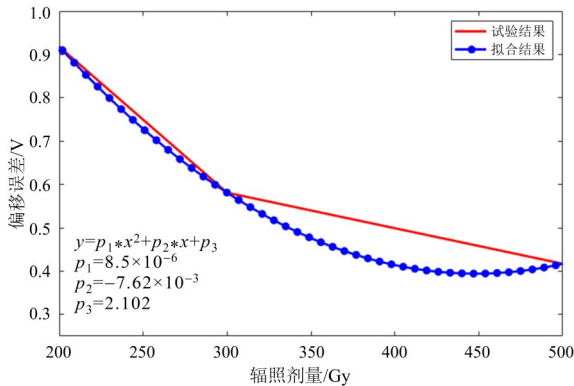


图 5 SAD9434 的 TID 效应 Off_error 参数拟合

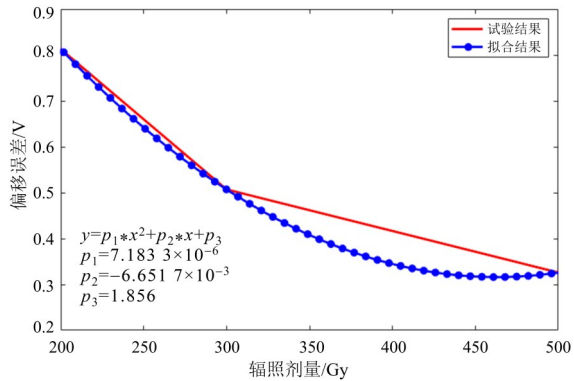


图 6 HWD7710 的 TID 效应 Off_error 参数拟合

AD 转换模块辐射效应的 VHDL-AMS 伪代码如算法 4 所示,以 SAD9434 为例,对上述算法 3 进行重构,加入了 TID 参数 Dose 和注量参数 Fluence,将算法 3 中的 Off_error 和 FS_error 使用拟合结果代替,其他内容和算法 3 一致.使用此模型,仿真时直接输入 TID 参数 Dose 或注量参数 Fluence,即可得到对应的仿真结果.

4 仿真结果与试验结果对比

本文选择了 HWD7710 和 SAD9434 两种 ADC,分别

算法 4 AD 转换模块辐射效应模块算法--SAD9434

输入: 模拟信号 input

输出: 数字输出 dout_vec, 整型输出 dout_integer, 回转比较 aout

1. GENERIC(Nbits:INTEGER:=12 //转换位数,定义属性
2. Vmax:VOLTAGE:=0.74 //最大参考电压
3. Tsmp:TIME:=0.05 μ s //转换周期
4. Dose:REAL:=200.0 //剂量
5. Fluence:REAL:= 3×10^{13} //注量
6. CONSTANT Off_error_fit_tid:REAL_VECTOR:=(8.5×10^{-6} , -7.62×10^{-3} , 2.1) //偏移误差总剂量效应拟合结果
7. CONSTANT FS_error_fit_tid:REAL_VECTOR:=(-6.63×10^{-5} , 4.32×10^{-2} , -4.7) //满刻度误差总剂量效应拟合结果
8. CONSTANT Off_error_tid:REAL:=offset_fit_tid(0)*Dose**2 + offset_fit_tid(1)*Dose+offset_fit_tid(2) //总剂量效应偏移误差计算
9. CONSTANT FS_error_tid:REAL:=FS_error_fit_tid(0)*Dose**2 + FS_error_fit_tid(1)*Dose + FS_error_fit_tid(2) //总剂量效应满刻度误差计算
10. CONSTANT Off_error_fit_flu:REAL_VECTOR:=(1.0×10^{-13} , -0.53) //偏移误差中子辐射效应拟合结果
11. CONSTANT FS_error_fit_flu:REAL_VECTOR:=(2.6×10^{-13} , -0.64) //满刻度误差中子辐射效应拟合结果
12. CONSTANT Off_error_flu:REAL:=offset_fit_flu(0)*Fluence + offset_fit_flu(1) //中子辐射效应偏移误差计算
13. CONSTANT FS_error_flu:REAL:=FS_error_fit_flu(0)*Fluence + FS_error_fit_flu(1) //中子辐射效应满刻度误差计算

测量了两者在 TID 效应下和 NR 效应下的工作参数,并建立了相应的辐射效应模型,最后通过对比仿真结果与试验测试数据,分析和验证了本文提出的建模方法的可靠性,同时证明了针对不同类型的 ADC 与不同辐射效应,都可以尝试使用本方法进行辐照模型建模.

4.1 Off_error 与 FS_error

4.1.1 TID 效应结果对比

本文测试了 3 个不同剂量点 200 Gy、300 Gy、500 Gy 下两种 ADC 器件的输入输出工作曲线,并计算了其 Off_error 与 FS_error. 本文对两项参数使用最小二乘法拟合,得到辐照剂量与对应参数的拟合方程并代入模型,使模型的 Off_error 等参数可以反映辐照效应的影响.

试验数据中,不同辐照剂量下的两种 ADC 的 Off_error 如表 2 所示. 仿真电路中,设定 ADC 参考电压为 10 V,输入信号为幅度 10 V,偏置电压 5 V 的正弦波,为使 ADC 模型输出结果可以充分反映其 Off_error,本文在 Off_error 仿真中屏蔽了 FS_error 方程作用代码,部分仿真结果如图 7 和图 8 所示.

以 SAD9434 在 TID 为 500 Gy 时的 Off_error 仿真结果为例:为增加采样结果的精确性,输入正弦信号频率

远低于 ADC 模型采样率,因此输出曲线在一定精度条件下近似连续曲线;采样结果曲线因辐照产生 Off_error 的影响发生向上偏移,由于参考电压为 10 V,超过 10 V 部分的采样值被截断,而在输入信号略低于 10 V 时,受辐照影响的采样信号仍为 10 V;受器件本身结构与辐照效应影响,ADC 输入到采样输出有一定程度延时,因此采样信号相对输入信号产生了明显的相移;因输入正弦信号最低电压为 0 V,屏蔽其他误差情况下,输出电压最小值即为 ADC 的 Off_error. 图 7 中,仿真结果中 ADC 输出数字信号的数值相对输入信号向上偏移 0.42 V,与试验数据 0.417 V 的 Off_error 偏移量相仿,图 8 中 HWD7710 在辐照影响下也呈现相同现象.

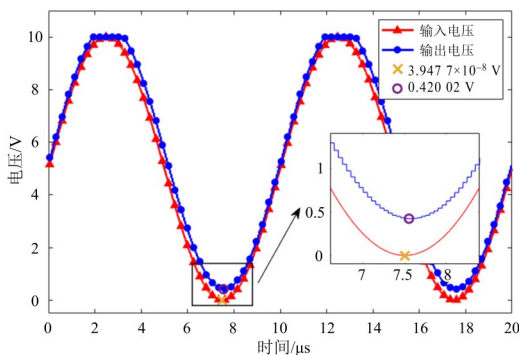


图7 SAD9434在500 Gy时的Off_error仿真结果

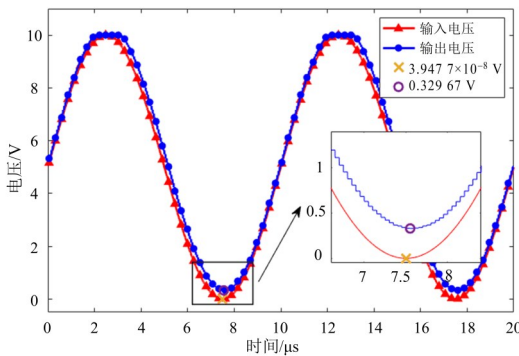


图8 HWD7710在500 Gy时的Off_error仿真结果

两种 ADC 在不同辐照剂量下的 Off_error 仿真与试验结果如表 2 所示,对比试验数据可知,TID 辐照时,随着辐照剂量的增加,Off_error 的数值向反方向偏移,导致器件 Off_error 随之减小,仿真结果与试验结果具有相同变化趋势.

虽然本文的重心旨在建立 ADC 的辐射效应模型,通过仿真评估 ADC 的辐射效应性能退化情况,即通过 ADC 顶层的行为输出来评估性能参数退化,而深入研究 ADC 内部的辐射机理并不在本文的范畴,但是为了

表2 SAD9434和HWD7710在不同剂量点的Off_error试验结果与仿真结果对比

ADC 型号	剂量点/Gy	试验值/V	仿真值/V	相对偏差/%
SAD9434	200	0.918	0.923	0.54
	300	0.581	0.586	0.86
	500	0.417	0.420	0.72
HWD7710	200	0.813	0.821	0.98
	300	0.507	0.513	1.18
	500	0.326	0.329	0.92

使试验结果和仿真结果更有可解释性,依旧根据试验数据呈现出的数据变化趋势,对 ADC 的辐射机理进行简述.

从表 2 可知,随着 TID 增大,SAD9434 和 HWD7710 的 Off_error 都呈现减小的趋势,其原因如下:TID 辐照导致晶体管的损伤,如界面态密度的增加和漏电流的增大等,这些因素导致晶体管的参数发生变化,如阈值电压和饱和电流等.在模数转换器中,这些参数的变化会导致 Off_error 的减小.具体来说,在模数转换器中,误差源是由两个晶体管的阈值电压不匹配引起的.当这些晶体管的阈值电压在辐照后发生变化时,它们之间的差异可能会减小,从而导致 Off_error 的减小.另外,辐射还可能导致器件参数的漂移和退化.这种漂移和退化可能会导致误差源的性质发生变化,进而使误差源的热漂移变得更加稳定.这种变化也会导致 Off_error 的减小^[15].

试验数据中,不同辐照剂量下的 ADC 的 FS_error 如表 3 所示.试验中,为使 ADC 输出结果可以直接体现 FS_error,本文在 ADC 输入信号中加入了一个与其失调电压相反的直流偏置电压,以抵消 Off_error 带来的影响.仿真中设定输入信号为 0~10 V 变化的线性时变信号,首先提取输入电压曲线与输出电压曲线,然后计算 ADC 输入输出延时,并在结果中通过添加相移的方式使 ADC 输入输出电压点对点,最终得到其输出电压和输入电压响应曲线,进而得出 FS_error 结果. FS_error 部分仿真结果如图 9 和图 10 所示.

以 TID 辐射剂量点为 200 Gy 条件下 SAD9434 仿真结果为例,受器件本身结构与辐照效应影响,在 ADC 实际输入电压低于满刻度 10 V 之前,ADC 输出电压已达到 10 V.通过 FS_error 的定义及其计算方法,得到仿真结果对应的 FS_error 为 13%FS,与实际测试结果 12.98%FS 相仿.不同 ADC 不同辐照剂量下的 FS_error 仿真与试验结果如表 3 所示,对比试验数据可知,随着辐照剂量的增加,FS_error 的数值减小,仿真结果与试验结果具有相同变化趋势.

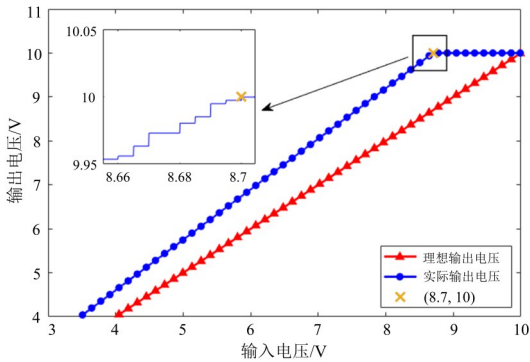


图9 SAD9434在 200 Gy 时的 FS_error 仿真结果

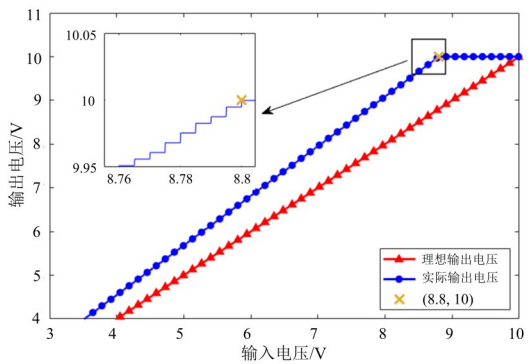


图10 HWD7710在 200 Gy 时的 FS_error 仿真结果

表3 SAD9434和HWD7710在不同剂量点的 FS_error 试验结果与仿真结果对比

ADC 型号	剂量点/Gy	试验值/ %FS	仿真值/%FS	相对 偏差/%
SAD9434	200	12.98	13	0.15
	300	23.05	23.1	0.22
	500	3.39	3.45	1.77
HWD7710	200	11.93	12	0.59
	300	22.38	22.4	0.09
	500	3.07	3.15	2.61

从表3可知,随着TID增大,SAD9434和HWD7710的FS_error都呈现先增大后减小的趋势,FS_error是指输出数字信号与理想输出数字信号的差值,即输出数字信号的最大值与理想输出数字信号最大值之间的误差.造成这种变化趋势的原因如下:

一是在低剂量点下,电离辐射的相互作用导致器件中的载流子密度增加,使得器件中的捕获中心数量增加,从而导致器件的输出误差增加.但是随着剂量继续增大,一些高能粒子在通过器件时可能会产生能量损失,使得器件中的缺陷浓度下降,因此FS_error会减小.

二是掺杂剂耐受性,在剂量较低的情况下,掺杂剂中的杂质原子会被电离,从而改变了器件的杂质浓度.当剂量继续增大时,这些杂质原子会重新结合,从而导

致器件中的捕获中心数量减少,FS_error也会减小^[15,16].

三是热效应,剂量较低时,器件中的电流密度会增加,从而产生较高的热效应.随着TID的继续增加,器件中的总吸收剂量也会增加,导致热效应减小,从而FS_error也减小.

4.1.2 NR效应结果对比

除TID效应测试外,本文还对实际器件与仿真模型进行了NR效应测试.在实际电路测试中,本文测试了 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 、 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 这2个NR注量下器件的Off_error与FS_error,并使用最小二乘法拟合得到了NR注量与对应参数的拟合方程,并将方程代入模型,使模型的Off_error参数可以反映辐照效应的影响.

仿真电路中的各器件参数设定与TID效应仿真电路相同,为屏蔽其他误差对仿真结果计算带来的影响,同样将其他误差与噪声模块等相关代码屏蔽,部分仿真结果如图11和图12所示.以图11为例:受NR影响,ADC采样结果曲线产生向下偏移,由于最低电压为0V,低于0V部分的采样值被截断,采样结果长时间为0V;受器件结构与辐射影响,采样结果相对输入信号产生明显相移;因输入正弦信号峰值电压为10V,屏蔽其它影响因素条件下,ADC理想最大输出电压与仿真结果之差即为Off_error仿真结果.仿真结果ADC输出数字信号的数值相对输入信号向下偏移0.213V,基本符合试验数据0.218V的偏移量.

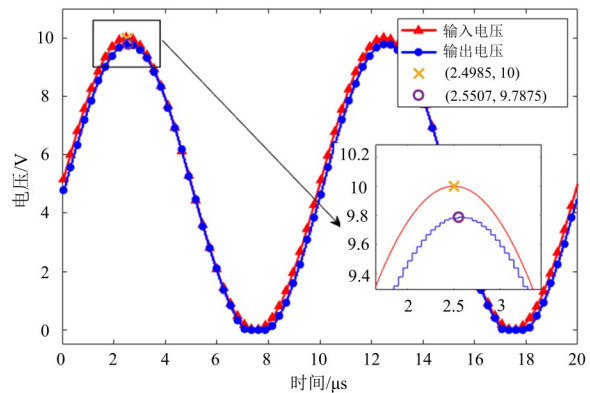


图11 SAD9434在 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 时的 Off_error 仿真结果

不同ADC不同注量下的Off_error仿真与试验结果如表4所示,对比试验数据可知,随着注量的增加,Off_error正向偏移,在两个剂量点下,Off_error的数值由小增大,仿真结果与试验结果具有相同变化趋势.

从表4可知,随着中子注量增大,SAD9434和HWD7710的Off_error都有增大的趋势,其原因如下:模数转换器的Off_error通常由器件内部参数的偏差造成,例如比例系数误差和偏移电压等.中子辐照会改变器件物理结构和材料特性,从而对这些参数产生影响,导

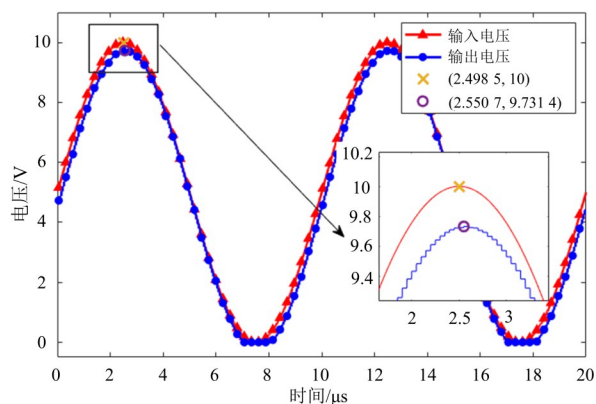
图 12 HWD7710在 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 的Off_error仿真结果

表 4 SAD9434和HWD7710在不同注量点的Off_error试验结果与仿真结果对比

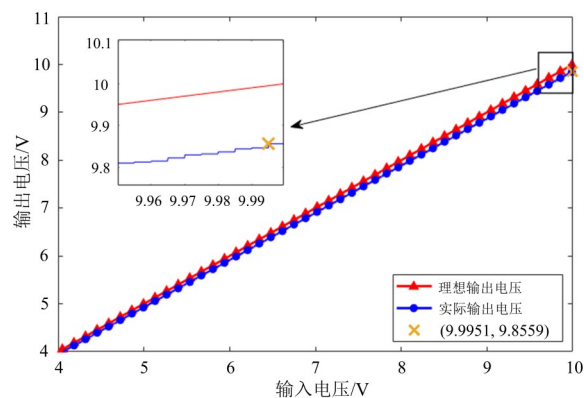
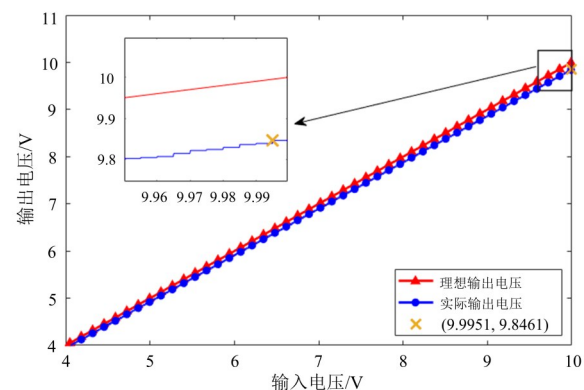
ADC 型号	注量/(n/cm^2)	试验值/V	仿真值/V	相对偏差/%
SAD9434	3×10^{12}	-0.218	-0.213	2.29
	1×10^{13}	0.508	0.515	1.38
HWD7710	3×10^{12}	-0.276	-0.269	2.53
	1×10^{13}	0.603	0.610	1.16

致Off_error的变化. 随着中子注量增大,中子与物质相互作用会导致器件内部能量沉积的增加,从而引起器件温度升高. 这会导致器件内部的PN结或金属-绝缘体-金属电容的电荷分布发生变化,进而改变了模数转换器的比例系数,导致Off_error增加^[17,18].

试验数据中,不同中子注量下的ADC的FS_error如表5所示. 试验中,为使ADC输出结果可以直接体现FS_error,在ADC输入信号中加入了一个与其失调电压相反的直流偏置电压,以抵消Off_error带来的影响. 仿真中设定输入信号为0~10 V变化的线性时变信号,首先提取输入电压曲线与输出电压曲线,然后计算ADC输入输出延时,并在结果中通过添加相移的方式使ADC输入输出电压点对点,最终得到其输出电压和输入电压响应曲线,进而得出FS_error结果. FS_error部分仿真结果如图13和图14所示.

以中子注量 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 条件下SAD9434仿真结果为例,受器件本身结构与辐照效应影响,当ADC实际输入电压达到满刻度10 V时,ADC输出电压仍低于10 V,显然此时ADC的FS_error为负值. 通过计算,仿真结果对应的FS_error为-1.44%FS,与实际测试结果-1.48%FS相符. 不同ADC不同辐照剂量下的FS_error仿真与试验结果如表5所示,对比试验数据可知,随着辐照剂量的增加,FS_error的数值上升,仿真结果与试验结果具有相同变化趋势.

经过验证,本建模方法对于两种ADC的静态参数

图 13 SAD9434在 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 时的FS_error仿真结果图 14 HWD7710在 $3 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 时的FS_error仿真结果

仿真均具有可靠效果,两种ADC模型在不同辐照仿真环境下的仿真结果与试验数据误差均在5%以内,验证了本方法的精确性与普适性.

表 5 SAD9434和HWD7710在不同注量点的FS_error试验结果与仿真结果对比

ADC 型号	注量/(n/cm^2)	试验值/% FS	仿真值/% FS	相对偏差/%
SAD9434	3×10^{12}	-1.48	-1.44	2.70
	1×10^{13}	19.92	19.95	0.15
HWD7710	3×10^{12}	-1.56	-1.54	1.28
	1×10^{13}	20.21	20.25	0.20

从表5可知,随着中子注量增大,SAD9434和HWD7710的FS_error都呈现增大的趋势,其原因如下:中子注量的增加会导致模数转换器中的一些部件发生辐射损伤,如电荷集电极、电容、电感和放大器等,进而导致模数转换器的FS_error增大. 具体来说,中子在模数转换器中的相互作用会导致电子和空穴对的生成和电离,这些电荷会被集中到集电极或电容中,从而改变其电容值或损伤集电极结构,进而导致FS_error的增加. 此外,放大器的增益也可能受到辐射损伤的影响,

进而影响模数转换器的输出精度^[17,18]。

4.2 动态参数结果对比

对于 SNR 和 ENOB 等动态参数和 INL 与 DNL, 由于需要对输出数据进行统计和 FFT 变换才能得到结果. 因此需要根据各个参数的定义, 编写 Matlab 代码计算出各参数值^[19,20]. 需要注意的是, 由于官方数据手册只提供 ADC 在未辐照情况下的性能参数, 因此, 在对比动态参数时, ADC 仿真模型中 TID 和中子注量参数均设置为 0.

在 SAD9434 模型 TID 效应试验中, 为与官方数据手册对比, 本文在仿真时设置转换位数 Nbits 为 12, 正弦输入信号频率为 30.3 MHz, 幅值为 1 V, 采样频率为 370 MHz, 采样 8 192 个点. 将 ADC 仿真后的数字输出波形数据代入 Matlab, 通过 FFT 变换获取各项动态参数指标. SAD9434 各指标仿真结果如图 15 所示.

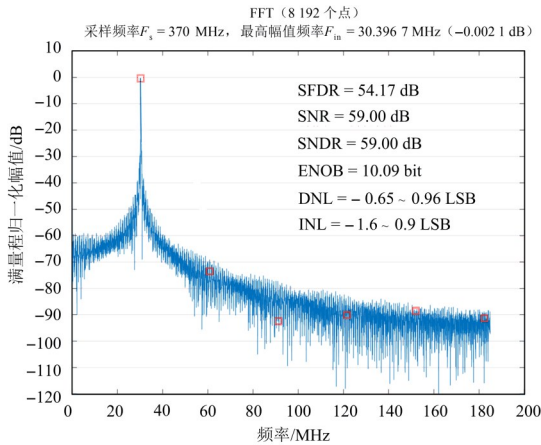


图 15 SAD9434 的动态参数计算结果

如图 15 所示, 最高幅值表示原始输入信号, 频率对应 30.3 MHz. 其他被小方框标示出的是谐波分量. SFDR 为 54.17 dB, SNR 为 59 dB, SNDR 为 59 dB, ENOB 为 10.09 bit, 仿真结果与数据手册对比如表 6 所示.

表 6 SAD9434 的动态参数仿真结果与数据手册对比

参数	手册值	仿真值	相对偏差/%
DNL/LSB	-1~1	-0.65~0.96	0.0
INL/LSB	-3~3	-1.6~0.9	0.0
SFDR/dB	72	54.17	24.76
SNR/dB	63	59.0	6.53
SNDR/dB	62	59.0	4.84
ENOB/bit	10.0	10.09	0.90

表 6 中, 各项动态参数仿真值与手册数据相仿, 而 SFDR 相差较大, 推测其原因如下:

(1) 在模型中加入了噪声的原因. SFDR 指的是信号的均方根值与最差杂散信号(无论它位于频谱中何处)的均方根值之比. 最差杂散可能是原始信号的谐

波, 也可能不是, 如果是原始信号, 说明噪声引起了原始信号的谐波成为最差杂散信号.

(2) SystemVision 仿真器的正弦信号质量问题, 高频时质量会减弱. 造成原始信号的谐波成为最差杂散信号.

此外, DNL 和 INL 仿真值的上下限位于手册值的上下限之间, 因此解释为相对偏差等于 0.0%.

在 HWD7710 模型 TID 效应试验中, 为与手册数据对比, 本文在试验中设置转换位数 Nbits=24, 正弦输入信号频率为 1.3 MHz, 幅值为 1 V, 采样频率为 10 MHz, 采样 8 192 个点. 然后将仿真数据代入 Matlab, 通过 FFT 变换获取各项动态参数指标. HWD7710 各指标仿真结果如图 16 所示.

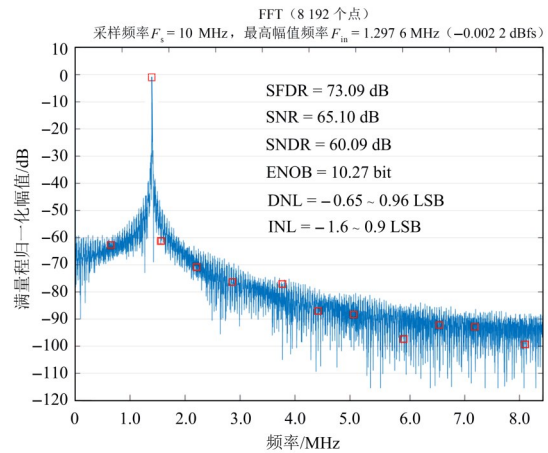


图 16 HWD7710 的参数计算结果

仿真结果与官方手册数据对比如表 7 所示(手册数据只提供了 HWD7710 的 DNL、INL 和 ENOB).

表 7 HWD7710 的动态参数仿真结果与数据手册对比

参数	手册值	仿真值	相对偏差/%
DNL/LSB	-1~1	-0.65~0.96	0.0
INL/LSB	-3~3	-1.6~0.9	0.0
ENOB/bit	12	10.27	14.43

仿真结果通过与试验结果和数据手册对比, 验证了所建模型的准确性和普适性, 可用于仿真评估在未知剂量或注量情况下 ADC 的性能.

5 结论

针对目前业界缺乏通用的且具有辐照效应仿真功能的 ADC 模型, 本文在基本 ADC 建模方法的基础上, 提出了基于 VHDL-AMS 建立通用 ADC 辐照效应模型的方法. 该方法能根据需要, 建立不同 ADC 器件的不同辐照模型, 表征不同辐射环境下的不同 ADC 的工作参数. 本文选择了 SAD9434 和 HWD7710 两款 ADC 器件, 分别建立了 Off_error 和 FS_error 这 2 个参数的 2 种辐射

效应模型,并进行了器件辐照效应试验与模型辐照效应仿真.通过试验与仿真结果对比,表明所建ADC辐照效应模型的静态参数仿真结果与试验结果的相对偏差在5%以内,动态参数中SFDR的相对偏差较大,但仍在可接受的范围内.证明该建模方法的普适性,对于不同类型ADC与不同辐射效应的建模都具有一定参考与指导意义,模型可用于大型电子系统辐照效应建模仿真.

致谢 感谢中国工程物理研究院电子工程研究所为辐照试验提供的帮助.

参考文献

- [1] GEORGOULOPOULOS N, HATZOPOULOS A. Real number modeling of a flash ADC using SystemVerilog[C]//2017 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET). Piscataway: IEEE, 2017: 1-4.
- [2] GEORGOULOPOULOS N, TSCHELIDOU C, HATZOPOULOS A A. Design of a system verilog-based sigma-delta ADC real number model[C]//2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). Piscataway: IEEE, 2019: 124-128.
- [3] SIFI N, MAGHREBI R. Design and implementation of a band-pass SD modulator model with non-idealities using simplorer VHDL[C]//2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Piscataway: IEEE, 2021: 790-795.
- [4] PANCHAL N. Design and simulation of sigma delta ADC using VHDL AMS[J]. International Journal of Engineering Development and Research, 2014, 2(1): 548-551.
- [5] WANG Y, WANG A, LI L, et al. A micro power high precision sigma-delta ADC with adjustable decimation ratio [C]//2019 IEEE 13th International Conference on ASIC (ASICON). Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [6] SEROV A N, SEROV N A, SHATOKHIN A A. Evaluation of the effect of successive approximation ADC nonlinearity on the measurement error of the phase spectrum[C]//2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE). Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [7] LI S, CHEN J, LIANG B, et al. Low power SAR ADC design with digital background calibration algorithm[J]. Symmetry, 2020, 12(11): 1757.
- [8] KIM K, OH S, CHAE H. Conception and simulation of a 2-Then-1-Bit/Cycle noise-shaping SAR ADC[J]. Electronics, 2021, 10(20): 2545.
- [9] SAPSANIS C, VILLEMUR M, ANDREOU A G. Real number modeling of a SAR ADC behavior using system verilog[C]//2022 18th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD). Piscataway: IEEE, 2022: 1-4.
- [10] KIRAN S, SHAFIK A, TABASY E Z, et al. Modeling of ADC-based serial link receivers with embedded and digital equalization[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(3): 536-548.
- [11] CHEN S T, ZHAO Z D. Constructral modeling method and simulation for pipeline ADC using VHDL-AMS[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(4): 91-96.
- [12] 刘太彬. 基于IBIS的数字集成电路行为级建模方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LIU T B. Research on Behavioral Modeling Method for Digital Integrated Circuits Based on IBIS[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [13] 申振胜. 基于VHDL-AMS的ADC建模及仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
SHEN Z S. Modeling and Simulation of ADC Based on VHDL-AMS[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [14] 张刚. 高可靠ADC单粒子试验测试系统研究及实现[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院人工智能学院), 2019.
ZHANG G. Design and Implementation of Signal Event Test System for High Reliability Analog to Digital Converter[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (School of Artificial Intelligence), 2019. (in Chinese)
- [15] 陈睿. 模数转换器(ADC)的总剂量辐射效应的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
CHEN R. Investigation of Total Radiation Effects on Analog-to-Digital Converter (ADC)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [16] 王旭利, 许献国, 姚远程, 等. 模数转换器的辐射性能及其试验测试技术研究[J]. 电子技术应用, 2009, 35(4): 107-109.
WANG X L, XU X G, YAO Y C, et al. Study on ADC radiation-tolerant performance and its testing technique[J]. Journal of Electronic Technology Applications, 2009, 35(4): 107-109. (in Chinese)
- [17] 王旭利, 许献国, 姚远程, 等. 模数转换器的辐射性能及其试验测试技术研究[J]. 电子技术应用, 2009, 35(4): 107-109.
WANG X L, XU X G, YAO Y C, et al. Study on ADC radiation-tolerant performance and its testing technique[J]. Application of Electronic Technique, 2009, 35(4): 107-

109. (in Chinese)

- [18] 王旭利. 模数转换器(ADC) γ , 中子辐射效应及其试验测试技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2009.
WANG X L. Research on γ and Neutron Radiation Effects in Analog-to-Digital Converters (ADCs) and Their Testing Techniques[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [19] ZHAI D, LI P, ZHANG J, et al. Additive neural network based static and dynamic distortion modeling for prior-knowledge-free nyquist ADC characterization[C]//2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Piscataway: IEEE, 2021: 292-296.
- [20] HOSEINI Z, LEE K-S, KWON C K, et al. Design of an 8-bit time-mode cyclic ADC based on macro modeling[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2020, 48(11): 1839-1852.



张馨丹 女, 2000年3月出生于江苏省徐州市. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为集成电路的辐射效应仿真方法.

E-mail: 936997839@qq.com



刘 刚 男, 1969年7月出生于湖南省岳阳市. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院教授. 主要研究方向为电子系统的辐射效应建模仿真方法、嵌入式系统信息安全.

E-mail: gliu@mail.xidian.edu.cn

作者简介



梁 博 男, 1996年5月出生于甘肃省定西市. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院在读博士. 主要研究方向为电子器件及系统的辐射效应建模仿真技术和三维互连结构的辐射效应建模方法.

E-mail: Liangbo@stu.xidian.edu.cn



刘锦辉 男, 1984年5月出生于陕西省杨凌县. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院副教授. 主要研究方向为电子系统辐射效应建模仿真方法、信号与信息处理、SoC技术研究与应用、PIM新型计算体系结构.

E-mail: jhliu@mail.xidian.edu.cn



张晓鹏 男, 1999年4月出生于山东省临沂市. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为电子系统的辐射效应建模仿真.

E-mail: 21031211446@stu.xidian.edu.cn



谭雯丹 女, 1999年5月出生于广东省深圳市. 现为西安电子科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为存内计算体系结构.

E-mail: 936997839@qq.com