

粒子探测电路的系统建模

殷树娟¹, 李翔宇²

(1 北京信息科技大学 理学院, 北京 100192; 2 清华大学 微电子学研究所, 北京 100083)

摘 要: 基于数字信号处理的方法在粒子探测器信号处理中应用越来越广泛. 在基于数字信号处理的粒子探测器研究中, 正确的高精度系统建模是重要环节. 本文在 MATLAB 的 Simulink 环境下建立了粒子探测系统的行为级模型, 包括探测器、噪声、模拟前端、模数转换器和数字滤波部分. 基于该模型, 本文实现了一个多通道粒子探测电路, 仿真分析了多通道粒子探测系统的输出波形及对应的能量谱 RAM, 验证了该模型的正确性和精度.

关键词: 粒子探测器; 系统建模; 读出电路; 数字梯形滤波器; 片上系统

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)07-0001-05

System Modeling of Particle Detector Circuit

YIN Shu-juan¹, LI Xiang-yu²

(1 College of Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: Method based on digital signal processing in particle detectors signal processing applications become increasingly widespread. In the study of particle detectors based on digital signal processing, the correct accurate system modeling is the important part. MATLAB Simulink environment particle detection system behavioral models, including the part of the detector noise, analog front end, an analog-to-digital converter and digital filtering. Implemented based on the model of a multi-channel particle detection circuit simulation analysis of the output waveform of the multi-channel particle detection system and the corresponding energy spectrum RAM, verify the correctness and accuracy of the model.

Key words: particle detector; system modeling; readout circuit; digital trapezoidal shaper; system on chip

1 引言

粒子探测系统是用于获取基本粒子的能量或时间等信息的信号采集、处理系统, 广泛应用于高能物理、核物理、深空探测的辐射检测中, 是粒子物理等基础学科研究的主要实验装置, 同时普遍存在于核医学、交通安保等应用核技术的生产生活领域^[1]. 随着集成电路的发展, 同样的芯片面积能集成更多的单元和功能, 在一个探测系统中需要的集成通道数不断增加, 越来越多的系统采用片上系统 (System On Chip, SOC) 实现方式, 大幅度减小系统的体积、功耗和费用. 因此, 采用 SOC 的实现方式才能满足

系统的高度集成的要求^[2-3], 所以, 粒子探测系统朝着 SOC 的实现技术发展. 在基于数字信号处理的粒子探测器的研究中, 正确的高精度的粒子探测系统建模是重要环节.

本文主要内容是基于 MATLAB 的 Simulink 环境建立粒子探测系统的行为级模型, 通过搭建一个多通道粒子探测系统验证模型的性能, 确定系统模块的参数, 验证模型的精度和正确性.

2 探测系统的总体架构

探测系统模型中除了主要组成部分粒子探测器外, 还包括噪声、前置放大器、其他模拟部分、模数转

换器(Analog-to-Digital Converter, ADC), 数字信号处理器部分和数据分析部分等模块, 如图 1 所示。

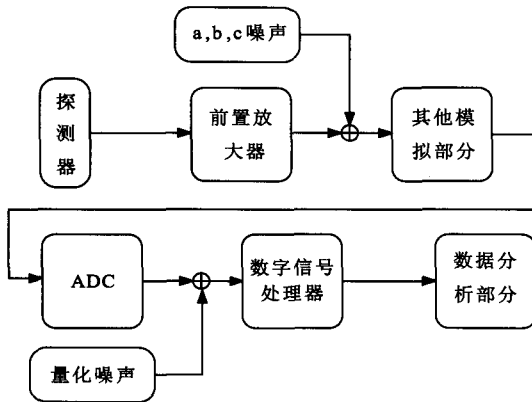


图 1 粒子探测系统示意图

3 粒子探测系统的行为级模型

3.1 粒子探测器模型

粒子探测器用于检测基本粒子。探测器输出的是一个电荷变化量, 如何选取电流脉冲模型不仅与探测器本身的结构有关, 而且与粒子与探测的作用点的位置相关。在本文中, 采用的是矩形电流脉冲^[4-5]。对粒子探测器建模的另外一个重要问题是电流脉冲的到来时间, 脉冲的到来时间是随机的, 也就是说, 脉冲在一定时间到来的总数是一个计数过程, 并且很显然, 它是一个独立的平稳的增量的计数过程, 也就是说是一个泊松过程。

假设 $N(t)$ 为在时刻 t 到来的脉冲总数, 那么根据泊松定理, 在时间间隔 $[t_0, t_0 + t]$ 内产生 n 个脉冲的概率为:

$$P\{[N(t_0 + t)] - N(t_0)\} = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

其中, $n=1, 2, \dots, \lambda$ 为平均计数率, 则

$$P(N(t)=0) = \exp(-\lambda * t)$$

$$P(N(t)=1) = \lambda * t * \exp(-\lambda * t) \quad (2)$$

所以下一个脉冲在 $[t, t + \Delta t]$ 产生的概率为:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3)$$

脉冲产生的时间分布函数 $F(t)$ 为:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - \exp(-\lambda * t) \quad (4)$$

假设 U 是 $(0, 1)$ 内均匀分布的独立随机变量, 由反分布函数 $\chi = F^{-1}(\mu)$ 得到的值即为下一个脉冲的到来时间, 它也是一个随机变量:

$$F^{-1}(U) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \mu) = -\frac{1}{\lambda} \ln(v) \quad (5)$$

即脉冲到来时间随机变量 $Y = -\frac{1}{\lambda} \ln(v)$, 其中 v 是 $(0, 1)$ 内均匀分布的独立随机变量, 可以用来表示下一个脉冲的到来时间。

3.2 噪声序列的建模

如图 1 系统模型所示, 系统中含有 a, b, c 噪声和量化噪声。 a, b, c 噪声是探测器漏电流噪声和电荷灵敏前置放大器 (Charge Sensitive pre-Amplifier, CSA) 中噪声等效到 CSA 输出端的噪声^[6]。量化噪声是由于 ADC 的量化作用所产生的噪声, 通过模拟产生这些噪声, 分析由于噪声导致的成形器输出端的脉冲幅度涨落, 就可以计算出系统的噪声性能。

3.2.1 a 噪声的建模

a 噪声即白噪声的功率谱密度是一个常数^[3]。在仿真建模的时候, 采用 Simulink 模块集 Source 提供的 Band-Limited White Noise 模块实现 a 噪声。Band-Limited White Noise 模块有三个参数, Noise power 为噪声的单边功率谱常数; Sample time 即为前面提及的相关时间; Seed 为随机序列生成器的开始种子, 不同的噪声源取不同的种子, 避免不同的噪声相关, a 噪声序列的生成模型如图 2(a) 所示。

3.2.2 b 噪声的建模

b 噪声的功率谱密度与频率的平方成反比, 对于 CSA 开关放电的情形来说, b 噪声序列可以通过白噪声经过一个积分器生成, 而对于连续放电的情形, b 噪声可以通过一个一阶低通的滤波器得到, 滤波器的极点对应的的时间常数是 $\tau_F = R_F * C_F$, b 噪声序列的生成模型如图 2(b) 所示。

3.2.3 c 噪声的建模

c 噪声也即 $1/f$ 噪声, 其功率谱密度函数与 $1/f^\nu$ 成正比, ν 是一个接近于 1 的常数。 c 噪声是无法通过白噪声转换过来的。本文采用了 SD toolbox 的 Coloured Noise 模块^[4-5]。当采用用户定义的功率谱时, 其参数有: Number of Sine Waves, 即为正弦波的总数; Number of Folds, 设置原始的功率谱密度函数被折叠的次数, 即: $N_f = f_{\max}/f$, c 噪声序列的生成模型如图 2(c) 所示。

通过以上的模型, 就可以分别生成 a, b, c 等三种噪声源了, 如前面所述, 量化噪声序列可以采用与 a 噪声序列相同的生成模型。

3.3 系统模拟部分的建模

3.3.1 前置放大器的建模

前置放大器有很多形式, 本文主要是针对电荷灵

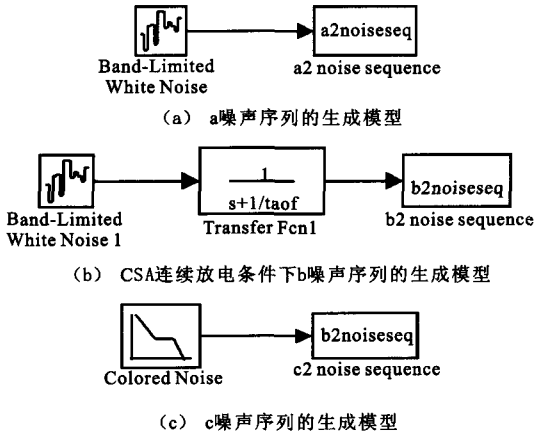


图 2 三种噪声序列模型

敏放大器(CSA)进行建模.电压灵敏放大器和电流型放大器也可以采用类似的建模方式.当不考虑电荷灵敏放大器中运算放大器的非理想因素的时候,对于连续放电的前置放大器,其传递函数可以表示为:

$$H_{CSA}(s) = \frac{1}{C_f} \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_f}} \quad (6)$$

其中, C_f 为 CSA 的反馈电容, $\tau_f = R_f * C_f$, R_f 是反馈电阻.当 CSA 为开关放电形式时, CSA 的传递函数可以表示为:

$$H_{CSA}(s) = \frac{1}{s * C_f} \quad (7)$$

如果考虑到 CSA 中的运算放大器的带宽有限,也就是说运算放大器本身也有一个极点,那么 CSA 的传递函数可以表示为:

$$H_{CSA}(s) = \frac{1}{C_f} \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_f}} \frac{1}{1 + s\tau_{amp}} \quad (8)$$

其中 τ_{amp} 为运算放大器的极点所对应的时间常数.

使用 Simulink 中连续(Continuous)模块集中的传递函数(Transfer Fcn)模块可以对以上各种形式的电荷灵敏放大器建模,只要改变其传递函数的分子分母的系数即可.

3.3.2 抗混叠滤波器建模

抗混叠滤波器也有很多的形式^[3,6],其中最常用的是巴特沃斯低通滤波器,它的幅度响应在通带内最平坦,它的幅度的平方可以有如下的形式:

$$|H_{aa}(s)|^2 = \frac{1}{\left(\frac{s}{j * \Omega_c}\right)^{2 * N} + 1} \quad (9)$$

其中 Ω_c 为低通滤波器的截止频率, N 为巴特沃斯滤波器的阶数.

对于一阶的巴特沃斯滤波器,其传递函数为:

$$H_{aa}(s) = \frac{1}{\frac{s}{\Omega_c} + 1} \quad (10)$$

对于二阶的巴特沃斯滤波器,其传递函数也可以表示为:

$$H_{aa}(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\Omega_c^2} + \frac{\sqrt{2} * s}{\Omega_c} + 1} \quad (11)$$

同理,对抗混叠滤波器的建模也可以采用连续(Continuous)模块集中的传递函数(Transfer Fcn)模块,只要修改其参数即可.

3.3.3 模数转换器的建模

模数转换器对模拟信号采样后,其输出是一个离散的序列,模拟信号实际上是经过了两个操作,一个是离散化,其次是量化.其与被采样的模拟信号的关系可以表示为:

$$\begin{cases} x(n) = x_{CT}(t) |_{t=nT_s} = x_{CT}(nT_s) \\ x_q(n) = x(n) + q(n) \end{cases} \quad (12)$$

这就是模数转换器在时域上的模型,其中 $x_{CT}(t)$ 为被采样的模拟信号, $x(n)$ 是采样后得到的归一化序列, $x_q(n)$ 是经过量化之后得到的序列, $q(n)$ 为量化噪声序列.

量化噪声实际上是一个限带的白噪声,可以使用生成 a 噪声的方法生成量化噪声.需要指出的是,量化噪声的大小不仅仅与最小量化间距有关,也与模数转换器的非理想因素有关,如采样时钟抖动等,最终的量化噪声可以用 ADC 的有效位数(ENOB)来衡量,由下面的表达式给出^[3]:

$$\begin{cases} \sigma_q = \frac{FSR}{2^{ENOB}} \frac{1}{\sqrt{12}} \\ N_q(\omega) = \sigma_q^2 \times 2/f_s, \quad 0 \leq f < f_s/2 \end{cases} \quad (13)$$

其中 FSR 为 ADC 的满幅量程, σ_q 为量化噪声的标准均方差, $N_q(\omega)$ 为其单边功率谱密度. Simulink 中有很多量化器模块,选取一个合适的均匀量化器即可, FSR 和位数都可以设定.

3.4 系统数字部分的建模

3.4.1 数字梯形滤波成形器的仿真建模

对数字梯形滤波成形器的分析可知,它的传递函数可以表示为:

$$H_{DT}(z) = \frac{G(1 - Bz^{-1})(1 - z^{-k})(1 - z^{-1})}{k(1 - z^{-1})^2} \quad (14)$$

在 MATLAB 中选取 DSP Builder 中的加法器,乘法器以及延时单元,根据它的传递函数连接起来,就可以得到梯形滤波成形器的模型^[5].由于在建模阶段,还没有确定运算单元和存储单元的位宽,所

以可以把位数取大一点,减小由于系数量化成有限位宽和舍去误差导致的模型不精确,可以通过对比理想的模型,检查所建模型的精度. 梯形滤波器成形器的模型如图 3 所示.

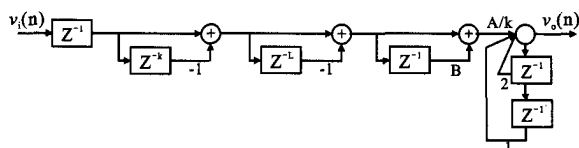


图 3 数字梯形滤波器的模型

3.4.2 峰值检测电路的建模

峰值检测模块的功能是从数据流检测是否存在脉冲. 峰值检测是检测是否存在梯形脉冲, 梯形脉冲峰部有一定的高度, 可以只检测数据流中大于某一参考值的数据, 而不必检测所有的数据. 峰值检测的一个核心模块是双沿检测模块, 也就是检测数据的上升沿和下降沿, 用一个标志信号来标识检测到数据是上升状态(1)还是下降状态(0), 所以, 在上升沿变成下降沿的时候, 也就是标志信号由 1 变成 0 的时候, 就是检测到脉冲峰值的时候. 由于噪声的存在, 即使是梯形的上升沿, 也有可能局部区域出现下降, 而这个地方并不是真正的峰值位置, 所以, 必须设定一个噪声阈值, 提高双沿检测的抗干扰性能.

3.4.3 堆积判弃电路的建模

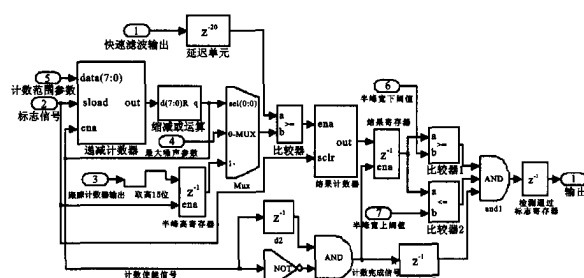
堆积判弃模块是判断检测到的脉冲是否存在堆积, 堆积发生有两种情况, 其一是在快速通道中已经发生堆积, 其二是在慢速通道中没有发生堆积, 但是脉冲之间间距太小, 在慢速通道中必然发生堆积. 对于不同的堆积情况, 采取不同的判弃方法^[3].

对于第一类堆积, 因为梯形脉冲的半峰高宽是一定的, 如果发生堆积, 那么脉冲的半峰高宽必然会变宽, 所以可以通过检测脉冲的半峰高宽来判断脉冲是否出现堆积. 其最终模型如图 4(a) 所示. 第二类堆积是快速通道中没有堆积, 但是慢速通道中必然会发生堆积的堆积判弃, 这个是通过计算峰值标志之间的间距来判断的, 如果峰值标志之间的检测小于慢速通道上升时间加上平顶时间, 则这两个脉冲在慢速通道中必然发生堆积, 其模型如图 4(b) 所示.

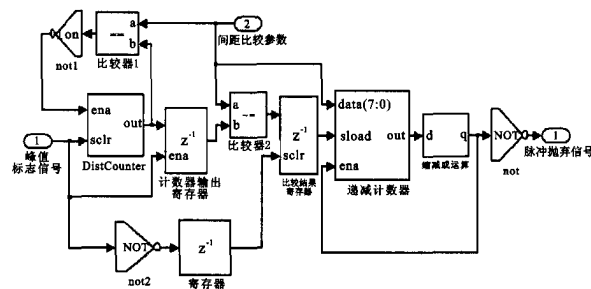
4 探测系统的仿真

为了验证模型的精度和正确性, 本文设计了一个多通道粒子探测系统, 如图 5 所示.

其中, 输入的脉冲为 ADC 采样输出数据, 输出数据为对输入信号的能谱分析结果, 仿真波形如图



(a) 第一类堆积判弃电路的模型



(b) 第二类堆积判弃电路的模型

图 4 第二类堆积判弃电路模型

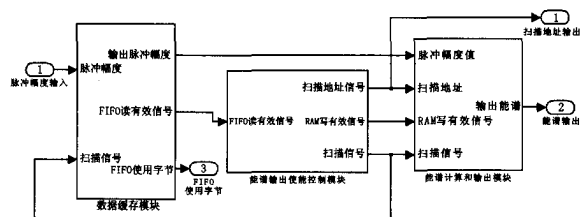


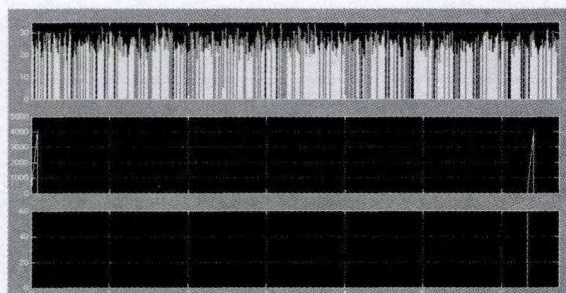
图 5 多通道粒子探测电路

6 所示. 第一行为多道分析电路的输入脉冲值, 第二行为多道的输出扫描地址, 第三行输出的是脉冲的能谱.

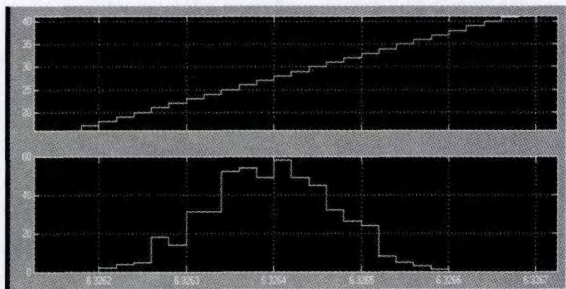
图 6 中统计的脉冲个数为 512, 多道分析电路在开始时初始化统计能谱的 RAM, 当统计的脉冲数达到设定值时就可以输出脉冲的能谱了. 由该多通道粒子探测电路可以发现, 本文搭建的粒子探测系统行为级模型正确实现了粒子探测器的功能, 满足应用要求.

5 结束语

本文在 MATLAB 的 Simulink 环境下建立了粒子探测系统的行为级模型, 包括探测器、噪声、模拟前端、模数转换器和数字滤波部分, 并基于该模型实现了一个多通道粒子探测系统. 仿真分析了多通道粒子探测系统的输出波形及对应的能谱 RAM. 可以看到, 本文搭建的粒子探测系统行为级模型正确实现了粒子探测器的功能, 满足应用要求, 验证了该模型的正确性和精度.



(a) 多道分析电路的仿真波形



(b) 多道分析电路的频谱输出

图6 多道分析电路的输出

参考文献:

- [1] 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 数字化多道脉冲幅度分析中的梯形成形算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(6): 810-812.

- [2] Warburton W K, Grudberg P M. Current trends in developing digital signal processing electronics for semiconductor detectors [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a—Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2006(568): 350-358.
- [3] 王晓宇, 杨海钢, 尹韬, 等. 低压低功耗阶跃增益对数域电流滤波器的状态空间设计方法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(7): 18-22.
- [4] Drndarevic V, Ryge R, Gozani T. Digital signal processing for high rate gamma-ray spectroscopy[J]. Nucl Instr and Meth, 1989(A277): 532-536.
- [5] 冯文晓, 陆铁军, 王宗民, 等. 一种全差分增益自举运算放大器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(12): 142-146.
- [6] 张雅聪. 半导体粒子探测器 CMOS 读出电路的设计研究[D]. 北京: 北京大学信息科学技术学院, 2008.

作者简介:

殷树娟 女, (1981-), 博士, 讲师. 研究方向为混合信号电路设计.

李翔宇 男, (1977-), 博士, 副教授. 研究方向为 SOC 系统设计、核电子学.