

粒子探测器读出电路噪声序列建模及验证

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: 在基于数字信号处理的粒子探测器的研究中, 由于粒子探测器入射粒子能量相对较低, 电路的噪声特性对电路最终性能影响非常大. 在 MATLAB 的 Simulink 环境下建立了粒子探测器读出电路的噪声模型, 包括热噪声、散粒噪声和低频噪声. 基于该模型仿真验证了三类噪声的功率谱密度随着输入信号频率变化关系, 三种噪声的功率谱密度函数曲线仿真结果与理论分析所得到的曲线很好地拟合. 另外, 三种噪声的功率谱密度函数曲线仿真结果与噪声序列通过功率谱计算得到的结果是一致的, 从而验证了所生成的噪声序列模型是正确的.

关键词: 粒子探测器; 读出电路; 噪声模型; 功率谱密度; 噪声序列

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)08-0013-03

Noise Sequence Modeling and Verification in Particle Detector Readout Circuit

YIN Shu-juan¹, LI Xiang-yu²

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

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

Abstract: In the study of particle detectors, based on digital signal processing, since the particle detectors for the relatively low energy of the incident particle, the noise characteristic of the circuit impact on the ultimate performance of the circuit is very large. Particle detector readout circuit noise model created in MATLAB Simulink environment, including thermal noise, shot noise and low-frequency noise. Simulation of the three types of the power spectral density of the noise on the basis of the model in this article a good fit to the three noise power spectral density function curve simulation results with the theoretical analysis of the curve obtained with the relationship of the input signal frequency changes. Further, the results are consistent with the simulation results with noise sequence of the three noise power spectral density function curve obtained by the power spectrum calculating, in order to verify the generated noise sequence model is correct.

Key words: particle detector; readout circuit; noise model; power spectral density; noise sequence

1 引言

粒子探测器读出系统是核电子学中很重要的一类系统, 它读取来自核探测器的电荷信号, 通过处理得到入射粒子的能量、时间和位置信息, 同时驱动下一级信号处理电路, 是粒子探测系统的变送器、信号调理和处理电路、模数转换器等功能模块的总称, 在探测系统中起着承上启下的作用^[1-2].

在粒子探测器读出电路中的噪声主要有三

类^[1,3]: 热噪声、散粒噪声和低频噪声, 分别称之为 a 噪声, b 噪声, c 噪声. a 噪声即热噪声也称为白噪声或电压噪声, 它的功率谱密度是一个常数. b 噪声即散粒噪声也称为电流噪声, 它的功率谱密度与频率的平方成反比. c 噪声是低频噪声, 也叫做 $1/f$ 噪声, 它的功率谱密度与 $1/f^\nu$ 成正比, ν 接近于 1, 与前置放大器中输入管的工艺以及器件类型有关. 本文的主要内容是在对粒子探测器读出电路的噪声特性分析基础上基于 MATLAB 的 Simulink 环境建

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(60236020); 北京市自然科学基金(4112029); 北京市教委科技面上项目(KM201211232018)

立粒子探测器读出电路的噪声行为级模型,并通过
对噪声功率谱密度的仿真验证该模型的性能。

2 探测系统总体架构及噪声源

探测系统模型^[2,4]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。

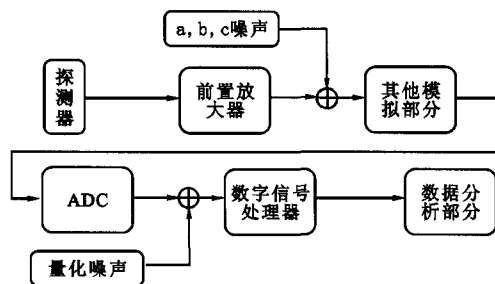


图 1 粒子探测系统示意图

如图 1 的系统模型所示,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 CSA 中噪声等效到 CSA 输出端的噪声,量化噪声是由于 ADC 的量化作用所产生的噪声。量化噪声也是白噪声,可以采用与 a 噪声相同的处理方法,因此,总体上讲在粒子探测器读出电路中的噪声主要有三类:热噪声、散粒噪声和低频噪声,即 a 噪声, b 噪声, c 噪声。通过模拟产生 a 噪声, b 噪声, c 噪声这些噪声,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 读出电路的噪声建模

3.1 a 噪声序列的建模

a 噪声即白噪声的功率谱密度是一个常数^[3,5]。在理论上说,白噪声的三个特征:相关时间为 0,平坦的功率谱密度和总的能量无限。但是,在实际上,并不存在这样的白噪声,因此,只要噪声的相关事件远远小于系统的最小的时间常数,就可以看做是白噪声。所以,在仿真建模的时候,通常用一个相关时间远小于系统最短时间常数的随机序列来模拟白噪声, simulink 模块集 source 就提供这样的模块,即 Band-Limited White Noise 模块。

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 为相关时间; Seed 为随机序列生成器的开始种子,在一个系统中,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 所示。

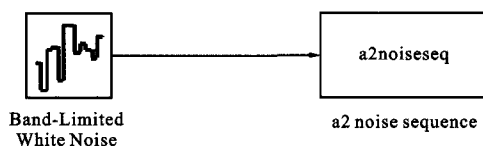


图 2 a 噪声序列的生成模型

3.2 b 噪声序列的建模

b 噪声^[1,5]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时间常数是 $\tau_F = R_F * C_F$, b 噪声序列的生成模型如图 3 所示。

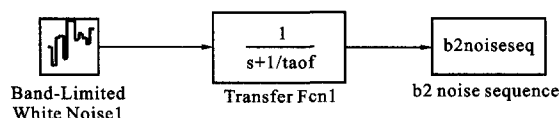


图 3 CSA 连续放电条件下 b 噪声序列的生成模型

3.3 c 噪声序列的建模

由于 $1/f$ 噪声的模拟无法直接由白噪声转换而来,相对比较困难,所以在以往的同类模型中都没有加入 $1/f$ 噪声源。随着工艺尺寸的不断降低, $1/f$ 噪声在总的噪声中所占的分量越来越重,尤其在 $0.18 \mu\text{m}$ 及以下工艺中 $1/f$ 噪声已经占到了总噪声的 40%~50%。因此, $1/f$ 噪声序列的建模,分析系统参数对 $1/f$ 噪声所引起的成形器输出脉冲幅度涨落亟待解决。

$1/f$ 噪声的功率谱密度函数与 $1/f^\nu$ 成正比, ν 是一个接近于 1 的常数。因此, c 噪声无法通过白噪声转换过来, c 噪声序列的建模相对比较困难。在这里,我们采用了 SD toolbox 的 Coloured Noise 模块,这个模块可以根据用户自定义的功率谱密度生成相应的噪声序列。其原理是可以把噪声看成一系列正弦信号的叠加,每一个正弦分量的幅度由噪声功率谱密度所定义,其相位是随机的。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;很明显,总数越多,生成的噪声序列的功率谱密度与用户定义的功率谱密度就越接近。 Number of Folds, 即设置原始的功率谱密度函数被折叠的次数, $N_F = f_{\max}/f_s$; 这个需要根据用户定义的功率谱的最大频率和采样率来确定, c 噪声序列的生成模型如图 4 所示。

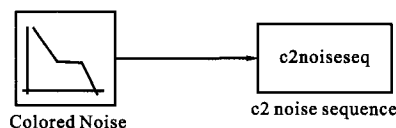


图 4 c 噪声序列的生成模型

4 噪声序列的模型验证

为了验证噪声序列模型的正确性和精度,噪声产生以后,需要验证它们的功率谱密度是否与之前预定的情况是否一致^[1-3].要计算噪声序列的功率谱,可以使用 FFT 或者其改进算法,在这里所采用的是 MATLAB 提供的 pwelch 函数,它是一种平均周期图的方法.

首先是用 Spectra 或其他的晶体管级仿真工具得到等效到前置放大器的输出端的噪声功率谱密度函数,通过数据拟合的方式得到 a, b, c 噪声的功率谱密度拟合函数进而得到对应系数,再按照所得到的系数通过上面生成噪声序列的方法产生噪声序列,最后通过 pwelch 函数求出噪声序列的功率谱,比较从 spectra 得到的功率谱密度曲线和噪声序列计算得到的功率谱曲线就可以验证生成的噪声是否满足要求,得到的结果分别如图 5、图 6、图 7 所示.

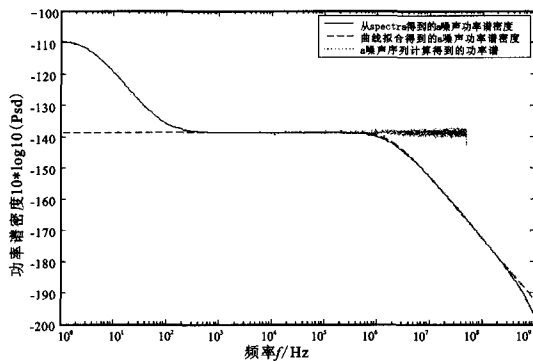


图 5 a 噪声序列的功率谱验证

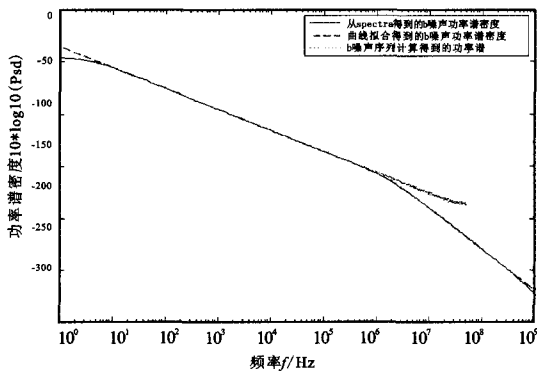


图 6 b 噪声序列的功率谱验证

从图 5、图 6、图 7 中可以看到,首先,三种噪声的功率谱密度函数曲线仿真结果与理论分析所得到的曲线很好地拟合.另外,三种噪声的功率谱密度函数曲线仿真结果与噪声序列通过功率谱计算得到的结果是一致的,从而验证了所生成的噪声序列模型是正确的,符合期望结果.需要说明的一点是,在实际的粒子探测系统中,存在多个噪声源的情况下,可

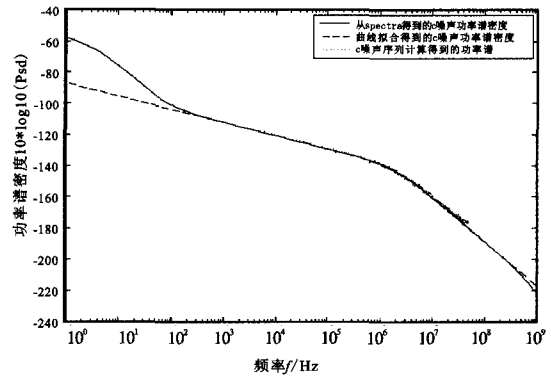


图 7 c 噪声序列的功率谱验证

以假定这些噪声源是独立不相关的,所以,这些噪声源生成的噪声序列也应该不相关,基于本文给出的噪声模型,这个可以通过改变模型中随机数的种子来实现.

5 结束语

本文在 MATLAB 的 Simulink 环境下建立了粒子探测器读出电路的噪声行为级模型,并寄予该模型仿真验证了三类噪声的功率谱密度随着输入信号频率变化关系.仿真结果表明:三种噪声的功率谱密度函数曲线仿真结果与理论分析所得到的曲线很好地拟合,功率谱密度函数曲线仿真结果与噪声序列通过功率谱计算得到的结果一致.采用本文给出的基于 MATLAB 的 Simulink 环境下建立了粒子探测器读出电路的噪声行为级模型将有利于粒子探测器读出电路数字化进程的推进.

参考文献:

- [1] 丁洋,王宗民,周亮,等.一种用于 16 位流水线 ADC 的多比特子 DAC 电容失配校准方法[J].微电子学与计算机,2012,29(6):172-176.
- [2] 陈新光,李翔宇.粒子探测器读出电路的数字滤波器设计[J].电子产品世界,2010,10(1):29-32.
- [3] 郭本青,文光俊.电流换向型 CMOS 混频器的周期时变噪声[J].微电子学与计算机,2011,28(11):18-22.
- [4] 敖奇,魏义祥.基于 DSP 数字化多道脉冲幅度分析器设计[J].核技术,2007,30(6):532-536.
- [5] Drndarevic V, Ryge R, Gozani T. Digital signal processing for high rate gamma-ray spectroscopy[J]. Nucl Instr and Meth, 1989(A277):532-536.

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.