

基于FPGA脉冲幅度分析器的 数字化基线估计方法

李伟男 杨朝文 周 荣

(四川大学 物理科学与技术学院 成都 610064)

摘要 从对数字化波形基线求取的准确性、实时性、灵敏度以及算法对硬件资源占有量等方面出发,分析直方图统计法和平均值法的优劣,提出了一种动态实时提取随机信号数字化波形基线的方法,并利用基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的数字多道脉冲幅度分析器对几种方法进行了测试。直方图统计法具有较高的准确性,将其结果与动态实时提取随机信号数字化波形基线方法的实验结果进行比较,验证了该方法在占有较少硬件资源和计数率较高的条件下,同样具有较高的准确性、实时性和灵敏度,并且对能谱分辨率有所改善。

关键词 数字化多道脉冲幅度分析器, 基线估计, 高计数率, 灵敏度, 能量分辨率

中图分类号 TL822⁺.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.060403

20世纪90年代以来,数字化核仪器得到了长足的发展,在很大程度上取代了部分模拟仪器,具有较高的稳定性及抗辐照能力。为使模拟数字转换器(Analog-to-digital Converter, ADC)工作在最佳状态,一些芯片甚至使基线工作于某些不为零的值。受探测器的漏电流、工频电源纹波、电路系统的温飘和放大系统不准确的极零相消等问题的影响^[1],基线会发生不确定的漂移。这将使采集的有用波形信号叠加在一个不稳定的基线电压水平上^[2],造成幅度测量结果的波动,导致能量分辨率下降。因此,准确获取并扣除当前条件下基线成为了提高数字系统能量分辨率的重要因素^[3]。

针对获取当前测量条件下的基线值,出现了很多解决方案,有数字和模拟的方法^[4]。而数字的方法中,使用数字示波器的方法较为主流,以Kalman滤波器^[5-6]以及IIR滤波器等为代表,此类算法较复杂,不适合现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)编程,故本文对此不做详细讨论。其它常用的方法还有直方图统计法、平均值法等。研究表明这些方法在准确性、硬件资源的耗用量以及对基线漂移响应的灵敏度和高计数率下的稳定性几方面不能做到“多全齐美”。本文提出的动态实时提取随机波形基线方法能很好地解决这些问题。

1 常规方法及问题

1.1 直方图统计法

在有限计数率下,一段时间内ADC连续全采样,其幅值在数字多道脉冲幅度分析器(Digital Multi-Channel Analyzer, DMCA)^[7-9]中可以得到如图1所示的统计结果。

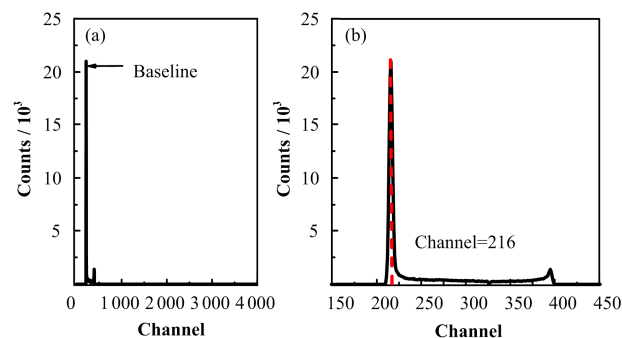


图1 DMCA连续采样点统计图(a)和局部放大图(b)

Fig.1 Figure of sampling point statistical (a) and partial detail (b).

图1(a)为DMCA能谱图,由于信号中处于基线的点较多,因此基线所在道址会形成一个远高于其他道址的峰。将图1(a)中峰所在位置放大,得到图1(b),虚线处即为基线所在道址,为第216道。

国家自然科学基金(No.11205108)资助

第一作者: 李伟男, 男, 1989年出生, 2012年毕业于四川大学核工程与核技术系, 现为硕士研究生, 研究方向为核技术及应用

通讯作者: 周荣, E-mail: r.zhou@foxmall.com

收稿日期: 2015-02-13, 修回日期: 2015-03-25

该方法可直接读取计数最高的道址作为基线值。若基线所在道址为 N ，每道计数为 $X(n)$ ，有：

$$N = X^{-1}\{\max(X(1), \dots, X(n))\} \quad (1)$$

该方法需将采样得到的点存储在寄存器中，统计点数量越多，测量值与真实值的误差越小。这样大量占用寄存器对诸如 FPGA 等资源有限的硬件提出了要求，当存储数量较大时，若基线漂移不会较快做出响应，其实时性也会受到影响。其突出的优点就是在一段时间内求取基线的准确率高。

1.2 平均值法

在 FPGA 中，应实现尽量简单的计算。最简单的基线估计方法是取脉冲到来前的 N 个点平均值作为基线值，然后由成形脉冲减掉这个基线值。该方法首先需寻峰^[10-11]，并将波形到来前的 N 个点存储下来，算法简单，不足之处在于此法可能不适用于计数率较大且下降沿较长的情况。

平均值法是取连续任意 N 个点，通过多次筛选求平均获得基线，具体方法是：

(1) 采集连续 N 个点存储并求平均，得到平均值 a 。

设这 N 个点为 $P(n)$ ， $n=1,2,3,\dots$ ，有：

$$a = \frac{P(1) + P(2), \dots, P(n)}{N} \quad (2)$$

(2) 通过筛选，在这 N 个点中选取小于等于平均值 a 的点求平均，得到平均值 b ，设有 m 个这样的点，其和为 Q ，有：

$$b = Q/m \quad (3)$$

(3) 依次类推，多次平均过后，平均值将逼近于基线值，然后继续采集 N 个点，进行下一次求取。

该方法也可求出基线，但不足之处有：(1) 如果 N 值选取过大，大量数据需要存储， N 值选取过小，这 N 个点可能刚好在脉冲上，求取到平均值必然不为基线；(2) 对 N 个点求平均值的次数关系到基线求取的实时性和准确性，当求平均次数较少时，准确性不高，次数较多时，实时性不高；(3) 对多个数求平均常用的方法是移位运算，特别是对 FPGA 器件，这是因为 FPGA 不擅长做除法运算，若强行使用除法运算会占用大量资源。使用该方法，每次求平均的被除数不一定是 2^n ，这样便无法进行移位运算。

1.3 平均值法实时提取随机波形信号数字化基线

为解决以上不足，对上述平均值法做一定改进，

采用流动的方式采样筛选，具体操作为：(1) 采集连续 N 个点求平均，得到平均值 c （注：与前文所述方法不同，该 N 个点不用存储，只需相加后移位， N 为 2^n ）；(2) 继续向后连续采点，筛选出小于等于 c 值的点，直至找到 N 个符合要求的点，求取平均值 d ，作为阈值继续筛选，并将每一次得到的平均值作为当前基线值。经过几次重复操作过后，得到的平均值将无限逼近于基线。

显而易见，当基线稳定时，求得的平均值不会发生改变，一旦基线发生下飘，平均值会很快逼近新的基线值。但如果基线发生上飘，由于采样点均大于上一次的阈值，将永远无法收集到小于等于阈值的 N 个点，那就无法识别基线上飘。

为解决该问题，对上述方法做部分改进：设置数值 M （允许余量），当连续采集 $M+N$ 个点，仍未收集到 N 个小于等于阈值的点时，判定基线发生上飘，程序跳到第一步，重新获取 N 个连续点求平均，重复筛选求平均值操作，能获取上飘后新的基线值。 M 值的选取应视具体情况而定，选取过小，会由于偶然计数偏大或其他因素发生程序跳转，称之为“过敏”。选取过大对基线上飘不够灵敏，且上述情况均在较低计数率的测量环境下讨论，若计数率过高， $M+N$ 个点内同样不可能采集到 N 个小于等于阈值的点，程序将持续跳转，每次所得平均值不是基线值。因此，高计数率下该方法失效。

为解决该问题，根据不同的计数率智能选取合适的 M 值，此处引入数值 K 对 M 进行修正。设每次（每次求平均）实际总采点数为 NUM ，具体流程如下：

(1) 连续采集 N 个点求得平均值 e ，设这 N 个点为 $W(n)$ ， $n=1,2,3,\dots$ ，有：

$$e = \frac{W(1) + W(2), \dots, W(n)}{N} \quad (4)$$

(2) 继续连续采样，筛选小于等于 e 的点，直至找到 N 个符合要求的点，求取平均值，并作为基线值。若本次求平均值，采集 $N+M$ 个点也未找到 N 个小于等于 e 的点，将值 $M+K$ 赋予 M ，并将程序跳转至第一步。但若 $N+M-NUM > K$ ，则将 $M-K$ 赋予 M ，否则 M 值不变，继续执行第二步，循环操作，公式如下：

$$M = \begin{cases} M - K & (N + M - NUM > K) \\ M & (N + M - NUM > 0) \\ M + K & (\text{Others}) \end{cases} \quad (5)$$

至此， M 的值将自动调节至合适大小，不会过大或过小。

2 实验结果

2.1 对比实验

针对不同周期相同幅度(2 V)的 γ 波, 用直方图统计法及动态实时平均值法进行基线求取, 并对比实验结果, 实验结果如图 2 所示, 三角形为直方图统计法所得结果, 五角星为动态实时平均值法所得结果。由于所用信号发生器输出频率较高时输出信号会出现基线小幅度偏移, 所以图 2 中基线在较高频率下偏低。直方图统计法有较高的准确率, 而采用动态实时求平均值法获得了同样的结果, 曲线与直方图统计法所得结果符合得很好。因此, 该方法准确性也较高。

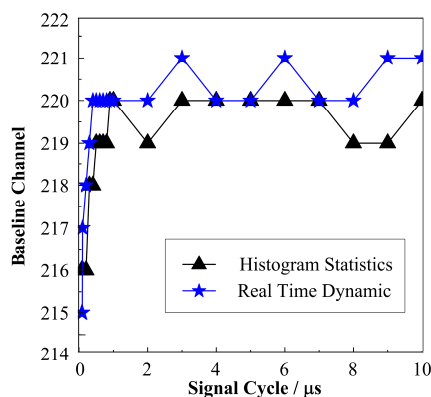


图 2 实验结果对比

Fig.2 Contrast of the experimental results.

2.2 模拟信号测试

基于 FPGA 的数字多道能谱分析仪对动态实时平均值法进行测试, 实验采用周期 100 ns、脉宽 80 ns、幅度 2 V 的 γ 波, 波形如图 3 所示。



图 3 实验使用 γ 波参数截图

Fig.3 Gamma waveform.

测试实验结果如图 4 所示, 图 4(a)为 DMCA 记录下基线的能谱, 将图 4(a)横向放大可得到图 4(b)。如图 4(b)所示, 基线所在道址分布有展宽, $\Delta=7$, 通过计算, 对应电压幅度波动范围 3.4 mV, 误差为 0.17%, 结果表明该方法准确性较高。

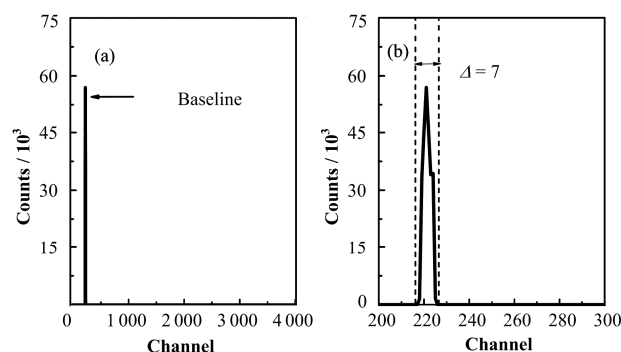


图 4 动态实时平均值法实验结果(a)及局部放大图(b)

Fig.4 Dynamic real-time mean value method experimental result (a) and partial detail (b).

2.3 实源测试

基于上述 DMCA, 测量实际的 ^{137}Cs 放射源能谱, 其放射性活度为 $50\,000\text{ s}^{-1}$, 能谱如图 5 所示。

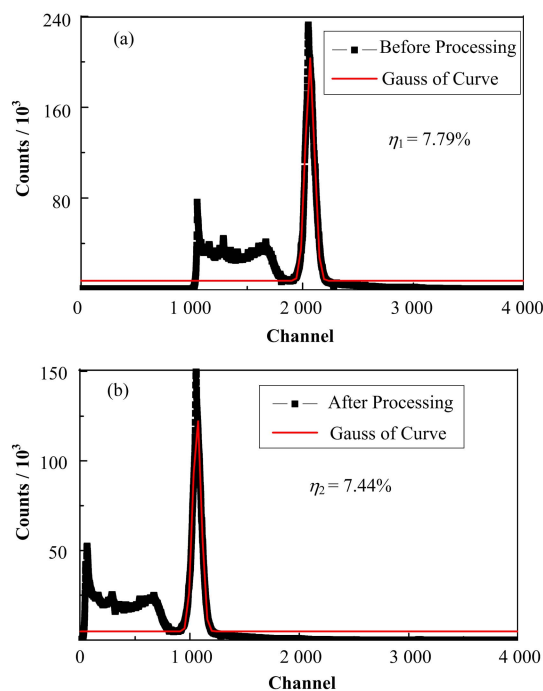


图 5 用该法处理前(a)和处理后(b)的 ^{137}Cs 特征峰

Fig.5 Characteristic peak of ^{137}Cs before processing (a) and after processing (b).

不对信号做其他滤波处理^[12-14], 使用该方法扣除基线后得到谱的分辨率为 7.44%。在用同样的探测器、多道分析器和相同计数率情况下, 未用该方法扣除基线所获取能谱的能量分辨率为 7.79%。此结果表明, 该方法对能量分辨率有一定改善^[15-18]。

3 结语

通过介绍直方图统计法和平均值法, 提出了动态实时求平均估计基线的方法, 该方法通过智能选取合适的 M 值, 保证了在占用较少硬件资源的条件下对基线的求取具有较高的灵敏度与实时性, 适用于不擅长做复杂运算的 FPGA 器件。通过与直方图统计法求取基线的结果进行了对比, 验证了该方法在准确性、实时性等方面的优势, 实现了高计数率 (10^7 s^{-1}) 下基线的准确求取。另外, 实验还验证了该方法还减小了测量中因基线偏移对系统能量分辨率的影响, 对能谱分辨率有所改善^[11,19-20]。

参考文献

- 1 陈亮. 核素识别算法及数字化能谱采集系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009
CHEN Liang. Nuclide identification algorithm and digital spectra acquisition system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009
- 2 Wang M, Zhou J, Fang F, *et al.* The study of baseline estimated in digital XRF analyzer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, **33**(4): 233-236
- 3 Ohi J, Yamakawa Y, Satoh M, *et al.* Development of a digital baseline restorer for high-resolution PET detectors[J]. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011, **54**(1): 3602-3604
- 4 用于数字多道脉冲幅度分析的基线恢复方法[P]. 103674988, 2014-03-26
Method for recovering baseline of digital multi-channel pulse amplitude analyzer[P]. 103674988, 2014-03-26
- 5 张同锋, 方方, 王敏, 等. 核辐射脉冲幅度分析的基线自适应 Kalman 滤波估计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(2): 203-206
ZHANG Tongfeng, FANG Fang, WANG Min, *et al.* Baseline adaptive Kalman filter estimation method for nuclear radiation pulse height analysis[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(2): 203-206
- 6 田鹏辉, 隋立春, 肖锋. 用 Kalman 滤波改进的背景建模红外运动目标检测[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, **51**(2): 287-290
TIAN Penghui, SUI Lichun, XIAO Feng. Infrared moving target detection based on Kalman filter background modeling improving[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2014, **51**(2): 287-290
- 7 梁卫平, 胡颖睿, 肖无云, 等. 数字化多道脉冲幅度分析器调理电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(4): 462-465
LIANG Weiping, HU Yingrui, XIAO Wuyun, *et al.* Digital multi-channel pulse height analyze pre-filter circuit design[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(4): 462-465
- 8 张怀强, 吴和喜, 汤彬, 等. 基于 FPGA 的数字核信号处理系统的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(2): 254-256
ZHANG Huaiqiang, WU Hexi, TANG Bin, *et al.* The study of digitizing nuclear pulse discriminator method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(2): 254-256
- 9 焦波, 武丽, 杨民, 等. 基于 FPGA 的多道脉冲幅度分析器设计[J]. 微型机与应用, 2013, **32**(24): 24-30
JIAO Bo, WU Li, YANG Min, *et al.* Design of the multi-channel pulse amplitude analyzer based on FPGA[J]. Microcomputer & Its Applications, 2013, **32**(24): 24-30
- 10 贾景光, 屈国普, 杨彬华. 基于 NaI(Tl) γ 谱仪的自动能谱分析的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(2): 251-254
JIA Jingguang, QU Guopu, YANG Binhua. The research of auto energy spectrum analysis based on the NaI(Tl) γ spectrometer[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(2): 251-254
- 11 张怀强, 汤彬, 吴和喜. 数字核谱仪系统中脉冲幅度提取方法研究[J]. 核技术, 2013, **36**(5): 050401
ZHANG Huaiqiang, TANG Bin, WU Hexi. Pulse amplitude extraction in digital nuclear spectrometer system[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(5): 050401
- 12 朱玉玉, 焦波, 杨民. 数字多道中梯形成形算法的 FPGA 实现[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(1): 78-82
ZHU Yuyu, JIAO Bo, YANG Min. FPGA-based trapezoidal shaping algorithm in the digital multi-channel system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(1): 78-82
- 13 鲍华, 樊瑜波, 饶长辉, 等. 基于均值查找的快速中值滤波算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(2): 76-79
BAO Hua, FAN Yubo, RAO Changhui, *et al.* Fast median filtering algorithm based on mean searching[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, **43**(2): 76-79
- 14 琚生根, 何坤, 周激流. 基于图像邻域特性的高斯噪声去噪[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(3): 76-79

- 139–144
JU Shenggen, HE Kun, ZHOU Jiliu. Gaussian noise removal on the local feature of image[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(3): 139–144
- 15 谢希成, 赖万昌, 赵祖龙, 等. LaBr₃(Ce)与 NaI(Tl)闪烁探测器的性能研究与比较[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(7): 917–920
XIE Xicheng, LAI Wanchang, ZHAO Zulong, *et al.* Test and comparison of lanthanum bromide and sodium iodide detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(7): 917–920
- 16 陈宗德, 王玥, 李晨晖, 等. PET 应用中的硅光电倍增器研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(增): 650–654
CHEN Zongde, WANG Yue, LI Chenhui, *et al.* Research of SiPM in PET application[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(Suppl): 650–654
- 17 胡颖睿, 肖无云, 梁卫平, 等. 基于嵌入式 FPGA 的数字化便携式 LaBr₃(Ce) γ 谱仪[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(8): 928–931
HU Yingrui, XIAO Wuyun, LIANG Weiping, *et al.* A portable digital γ spectroscopy with LaBr₃(Ce) detector implemented by embedded FPGA[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(8): 928–931
- 18 张庆贤, 葛良全, 谷懿, 等. 基于极大似然估计的 NaI(Tl)晶体仪器谱解析方法研究[J]. 核技术, 2011, **34**(8): 569–574
ZHANG Qingxian, GE Liangquan, GU Yi, *et al.* The unfolding of NaI(Tl) γ -ray spectrum based on maximum likelihood method[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(8): 569–574
- 19 Chen Z C, Leng Y B, Zou Y, *et al.* Baseline recovery method to measure bunch charge under low-current mode of SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2011, **22**(5): 261–264
- 20 Ma J Y, Zhao J W, Shi X D, *et al.* A new multi-parallel-beam collimators with improved sensitivity for SPECT[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**(2): 90–96

Baseline estimation method of digital multi-channel pulse height analyzer based on FPGA

LI Weinan YANG Chaowen ZHOU Rong

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract Background: Histogram statistics method and average value method are widely used to obtain the baseline of nuclear signal processing. However, there still exist several shortcomings, such as low accuracy, weak real-time character and high hardware resource occupancy. **Purpose:** This study aims to improve the accuracy and the real-time performance of the baseline extraction for the digital nuclear instruments. **Methods:** A novel method of obtaining baseline is proposed, it is a real-time dynamic average method that can be easily implemented on a Field-Programmable Gate Array (FPGA) based multi-channel pulse height analyzer. By setting appropriate parameters, the accuracy and real-time character could be obviously improved. **Results:** This novel method not only occupies less hardware resource, but also achieves higher accuracy. The energy resolution of ¹³⁷Cs spectrum is got improved to 7.44%. **Conclusion:** This method can be applied to extract baseline of digital multi-channel pulse height analyzer with high accuracy and real-time response.

Key words DCMA, Estimate baseline, High counting rate, High sensitivity, Energy resolution

CLC TL822⁺.4