

基于数字化的通用获取系统及波形分析算法

吴鸿毅, 李智焕*, 吴婧, 华辉, 王翔, 李湘庆 and 徐川

Citation: [科学通报](#) **66**, 3553 (2021); doi: 10.1360/TB-2021-0552

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2021-0552>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/66/27>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[动力控制系统数字仿真的局部解析算法](#)

Science in China Series A-Mathematics, Physics, Astronomy & Technological Science (in Chinese) **18**, 989 (1988);

[基于波形分类和子波形提取的雷达高度计近海波形重构算法](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **41**, 1706 (2011);

[基于扰动分析的随机离散事件系统的优化算法](#)

Science in China Series E-Technological Sciences (in Chinese) **26**, 56 (1996);

[一种光学-数字混合图象分析系统及其在海洋波高测量的潜在应用](#)

Science in China Series A-Mathematics, Physics, Astronomy & Technological Science (in Chinese) **19**, 195 (1989);

[基于高阶统计量的盲源提取算法获取房颤信号](#)

Science in China Series F-Information Sciences (in Chinese) **38**, 2212 (2008);



基于数字化的通用获取系统及波形分析算法

吴鸿毅, 李智焕*, 吴婧, 华辉, 王翔, 李湘庆, 徐川

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhli@pku.edu.cn

2021-06-08 收稿, 2021-08-01 修回, 2021-08-04 接受, 2021-08-05 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404403)、国家自然科学基金(12035001, 12075006, 11675003)和北京大学核物理与核技术国家重点实验室开放课题(NPT2020KFY18)资助

摘要 随着核物理实验研究对象向远离稳定性核区拓展, 传统的模拟电子学获取系统已经无法满足短寿命、低产额、高本底实验的需求. 近年来, 数字化获取系统在核物理研究中得到了广泛应用, 并显示出相对于模拟电子学系统的显著优势. 本文介绍了北京大学实验核物理组近年来开发的一套通用数字化获取系统及波形分析算法. 该获取系统已经成功应用于中国原子能科学研究院、中国科学院近代物理研究所、中国科学院高能物理研究所东莞研究部、南非iThemba LABS等国内外单位的实验终端上开展的多个实验中, 取得了很好的效果.

关键词 数字化获取系统, 触发, 参数优化, 波形分析

核探测系统利用核辐射产生的粒子在探测介质中引起的电离、激发等效应来测量辐射粒子的类型、强度、能量和时间等相关信息, 其中核电子学是核探测系统的重要组成部分. 探测器的输出信号需要用电子学模块进行处理和分析, 才能得到所需信息. 根据核探测器的类型和应用场景, 电子学的实现可以有很大不同. 模拟电子学将电子学信号的处理模块化(插件), 在相同的电气和信号传输标准下, 每种插件实现相对单一的功能, 通过不同插件的组合来实现复杂的功能.

图1(a)以半导体探测器为例, 说明模拟电子学中探测器信号的处理流程. 模拟电子学一般分为能量测量和时间测量. 对于能量测量, 主放大器将来自前置放大器的信号经过整形之后送往峰值灵敏的模/数转换器(analog-to-digital converter, ADC)中. 对于时间测量, 通常需要先经前置放大器的信号经过快时间滤波放大器处理后送到时间甄别单元, 然后将产生的逻辑脉冲送到时间数字转换器(time-to-digital converters, TDC)中用于时间测量.

近年来, 随着Flash ADC和相关数字信号处理技术的快速发展, 对波形的实时采集成为可能, 数字化方法在实验核物理中得到了广泛的应用, 显示出相对于模拟电子学系统的显著优势^[1~5]. 将辐射探测脉冲直接进行数字化处理的历史可以追溯到20世纪80年代^[6,7], 当时人们使用数字示波器或瞬态记录仪进行了原理验证测量. 20世纪90年代初期, 随着具备20 MHz及以上采样频率的快速ADC能以足够的精度记录核谱学探测器脉冲, 市场上出现了第一个商用数字谱仪系统. 其中最具代表性的是XIA LLC的DXP-4C^[1], 目前已经成为高纯锗(high-purity germanium, HPGe)探测器测量系统的标准配置设备.

图1(b)为数字化系统的原理框图. 数字化系统在第一时间将前置放大器/光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)的输出信号进行数字化, 然后在现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)中进行实时的信号处理. 模拟电子学中的绝大部分功能模块, 在数字化系统中都可由一个几平方厘米大小的芯片来完

引用格式: 吴鸿毅, 李智焕, 吴婧, 等. 基于数字化的通用获取系统及波形分析算法. 科学通报, 2021, 66: 3553–3560

Wu H Y, Li Z H, Wu J, et al. A general-purpose data acquisition system and a waveform analysis algorithm based on digitization (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3553–3560, doi: 10.1360/TB-2021-0552

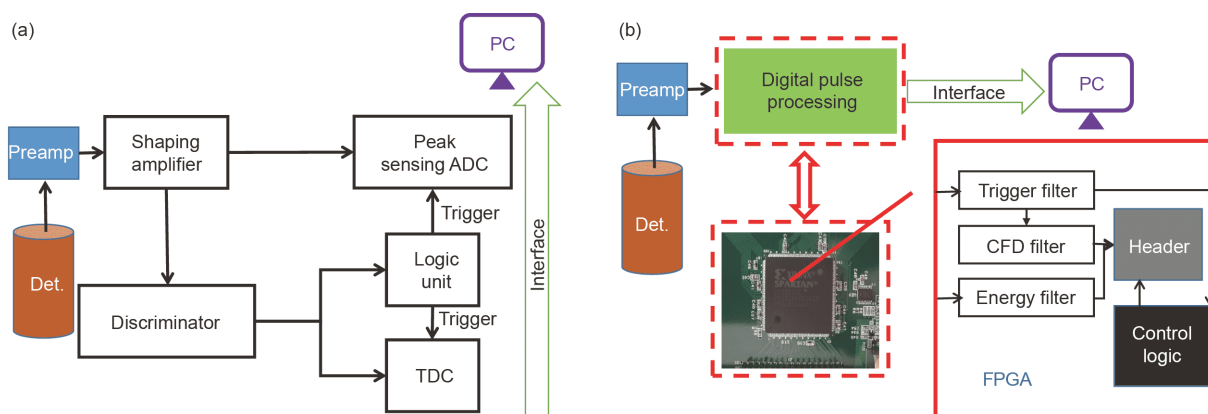


图1 (网络版彩色)模拟获取系统(a)和数字化获取系统(b)原理框图

Figure 1 (Color online) Diagrams of the analog acquisition system (a) and the digital data acquisition system (b)

成, 因此每通道的成本相比于模拟电子学更低。同时, 还可根据需求随时更改数字算法来实现不同的功能, 例如提取能量、时间、波形、粒子种类信息等, 其本质是数字信号的软件化处理, 具有极大的灵活性。目前在能量测量方面, 数字化获取系统可以完全取代模拟电子学获取系统。在高精度时间测量上, 模拟电子学还暂时优于数字化方法, 但近年来随着数字化定时取得的快速进展, 数字化方法有望在10年内完全取代模拟电子学。

基于当前国际上已有的数字化获取系统的现状以及国内核物理实验的特点, 北京大学实验核物理组近年来开发了一套通用数字化获取系统。这套数字化获取系统通过专门开发的触发插件, 支持复杂的触发逻辑, 其离线参数调节及在线监测非常方便, 大大降低了数字化系统在核物理实验中的应用难度, 目前在国内外的一些实验中已得到成功应用。本文主要介绍这套通用数字化获取系统的基本性能和应用情况。

1 通用性数字化获取系统

这套系统主要由XIA LLC提供的16通道数字脉冲处理器Pixie-16模块^[8]和可编程逻辑模块MicroZed-based trigger I/O(MZTIO)^[9]组成, 如图2所示。Pixie-16模块位于基于CompactPCI/PXI标准的Pixie-16机箱插槽中, 可以高达109 MB/s的速率将实验数据从模块存储器传输到主机。系统通信和控制通过光纤连接的PCI-8366/PXI-8368模块进行。对于可扩展的通用数字化获取系统, 需要能够在多个机箱中实现时钟同步以及触发信号的共享, Pixie-16时钟和背板触发I/O模块^[5]提供了此功能, 该模块目前最多可以支持8个机箱的时钟同

步。MZTIO用来实现PXI背板和模块前面板之间的信号连接, 并在FPGA中对它们进行逻辑组合, 产生实验所需的采集逻辑。

1.1 定时和能量算法

Pixie-16模块采用数字梯形滤波器^[8,10], 将电荷灵敏型前置放大器产生的典型指数衰减信号转换为梯形脉冲, 用于快时间和脉冲幅度测量。每个滤波器有两个主要参数, 分别是梯形滤波的上升时间和平台时间。对于快时间/触发滤波(fast/trigger filter), 滤波器采用较小的时间参数, 此时梯形脉冲幅度与输入信号上升沿的斜率成正比。数字恒比定时滤波器(constant-fraction discrimination, CFD filter)利用经典的恒比定时算法^[8,11], 提取快时间信号与幅度无关的定时信息。对于

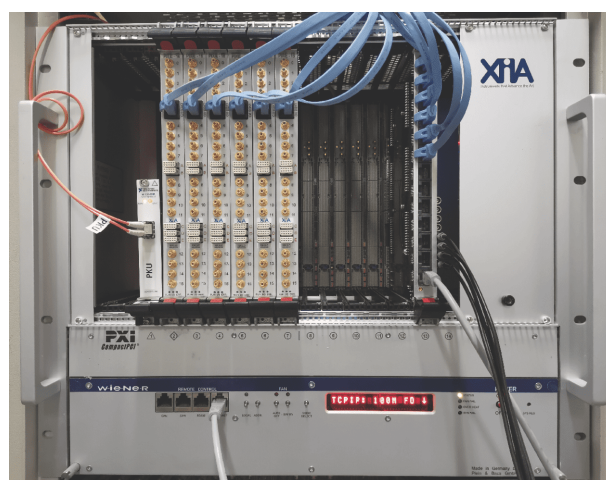


图2 (网络版彩色)典型数字化获取系统外观图

Figure 2 (Color online) A typical digital data acquisition system

脉冲幅度/能量滤波(slow/energy filter),采用较大的时间参数,此时梯形脉冲的幅度与输入信号的幅度成正比。在幅度测量中,还需要第三个参数来校正前置放大器输出信号的指数衰减^[10]。图3(a)给出了来自探测器前置放大器的一般信号。图3(b)和(c)显示了触发滤波和数字恒比定时算法对图3(a)中信号的响应,而图3(d)显示了能量滤波算法的响应。

1.2 触发系统

目前国际上大多数数字化获取系统采用的模式是定制专用固件,即系统只能运行在特定的预设触发模式下。这对于一个比较固定的探测器阵列或者实验装置是一个较优的方案,但该模式对于探测器设置经常发生变化的核物理实验并不适用。对于这样的实验,数

字化获取系统具有足够灵活的触发系统是非常重要的。该数字化获取系统的触发系统由相互关联的两部分组成:内部触发和外部触发。

当来自前置放大器/PMT的输出信号超过Pixie-16模块中用户预设的阈值时,将产生内部触发。对于Pixie-16标准固件,每个Pixie-16模块的输入通道都可以与自身模块和左右相邻模块的通道进行多重性判选或符合逻辑运算,允许参与信号的最大数目为48路^[8]。

为了实现更大范围信号之间灵活的触发逻辑,我们与XIA LLC合作开发了一个通用的可编程逻辑模块MZXIO来产生外触发信号。系统将不同类型探测器的触发逻辑信号送到MZXIO模块中,在模块中完成了实验所需的采集逻辑组合^[12]。为了简化实验过程中的逻辑开发,一些具有基本功能的简单VHDL/verilog模块被封装,用来快速实现MZXIO模块固件的开发。与模拟电路相比,该模块基于FPGA的采集逻辑,大大简化了系统的复杂度,具有可调范围宽、可远程配置等优点。另外,通过子卡可以将其他采集系统的逻辑、束流脉冲等信息直接输入到MZXIO模块中参与有效触发的生成。为了便于触发逻辑调节,MZXIO可将系统内部的逻辑信号输出到示波器,通过远程访问示波器的模式来实现在线的逻辑检查与调节,并且通过专门开发的符合时间调节控制网页,可以方便地测量逻辑脉冲信号之间的时序分布,为调节采集门延迟和采集门宽提供精准的判断依据。

1.3 离线参数优化

在模拟电子学获取系统中,用户通过调节主放大器、快放大器、甄别器等设备上的旋钮来设置参数,并在示波器上观察参数调节对信号的影响。在数字化获取系统中,数字化采集模块对所有信号的处理都是在数字化采集卡内部进行。因此,用户首先需要使用软件将参数传递给采集卡模块,然后再查看参数设置的效果。对于当前国际上使用的大多数数字化获取系统,实验参数的优化都是采用在线模式进行的,即在模块工作的情况下,用户通过调整参数观察其效果,反复调节直到得到最优化的参数为止。对于涉及大量通道的实验,这种参数调节方法非常耗时。

为此,在该系统中,我们开发了一系列的离线工具,可以针对各种类型的探测器高效、快速地进行参数优化设置。通过离线计算得到的响应与FPGA内部算法在线计算得到的结果是等价的。已经开发的离线分析工

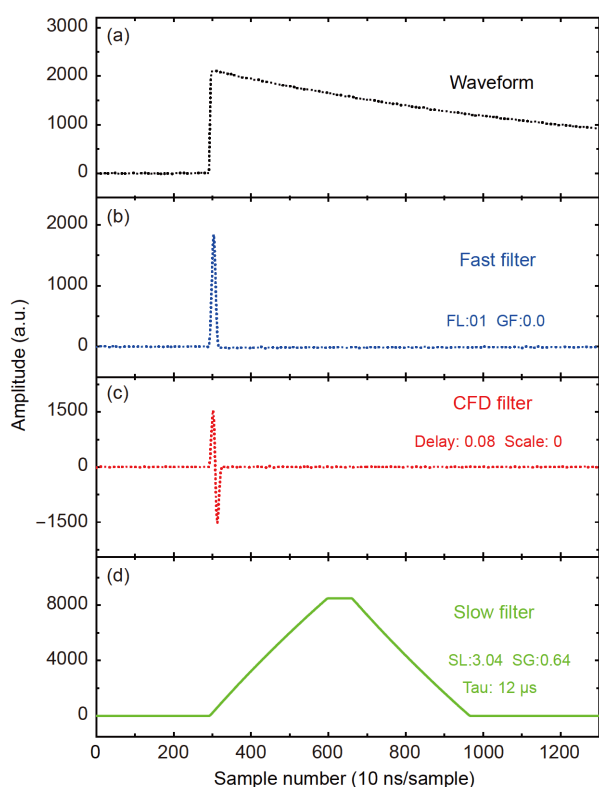


图3 (网络版彩色)数字滤波算法的响应。(a)来自探测器前置放大器的一般信号;(b)图(a)所示信号的触发滤波算法响应;(c)图(b)所示波形对数字恒比定时算法的响应;(d)图(a)所示信号的能量滤波算法响应

Figure 3 (Color online) The response of the digital filtering algorithm. (a) Generic signal from a detector's preamplifier. (b) Response of the trigger filter algorithm when applied to the signal as shown in panel (a). (c) Response of the digital CFD algorithm when applied to the signal as shown in panel (b). (d) Response of the energy filter algorithm when applied to the signal as in panel (a)

具包括滤波响应计算、阈值优化、能量参数优化、数字恒比定时甄别参数优化、离散傅里叶变换等。通过图4所示离线参数优化的滤波响应计算及参数调节界面, 用户能够直观方便地调节和优化各种参数。

2 数字化获取系统在实验中的应用

2.1 在束伽马谱学

这套数字化获取系统近年来已经在中国原子能科学研究院、中国科学院近代物理研究所和南非iThemba LABS进行的在束 γ 谱学实验中得到了成功的应用。实验中, HPGe探测器采用自触发模式运行, 同时通过MZTIO生成所有HPGe探测器的一重、两重触发逻辑, 为其他辅助探测器提供外部有效采集门逻辑信号。

对于高计数率下的 γ 能谱测量, 脉冲信号的堆积会导致探测器能量分辨迅速变差。为了减少堆积信号的影响, 模拟电子学通常使用脉冲堆积拒绝电路将时间间隔小于几倍成型时间内的主放大器的堆积信号去除, 虽然能量分辨不会变差, 但是丢掉了很多有效事件。在数字化获取系统中, 可以通过对堆积信号进行解谱来提取脉冲的幅度信息(最小脉冲时间间隔可达100 ns), 从而大大提高高计数率下的能谱性能。此外, 在传统的模拟获取系统中, 峰值灵敏的ADC的模数转换时间一般在几微秒; VersaModule Eurocard(VME)等总线的数据传输机制导致平均采集一个事件需要几十到几百微

秒, 这些都使得系统具有较大的死时间。模拟获取系统的计数率上限通常为每秒几千个触发, 而在数字化系统中, 信号处理和传输时间大大降低, 系统可以承受每秒高达数十万的计数率。

图5给出了模拟和数字化获取系统测量的HPGe探测器在 ^{62}Cu 的925 keV峰值下能量分辨率与探测器计数率(从3000/s到11000/s)的变化关系。可以明显看到, 随着计数率的提高, 数字化获取系统的能量分辨率几乎保持不变; 而在模拟获取系统中, 当计数率较低时, 能量分辨率与数字化获取系统相当, 但当计数率较高时, 能量分辨率则显著变差。图6展示了一个HPGe探测器在3.1和8.8 k/s的触发率下, 模拟和数字化获取系统记录得到的能谱(模拟电子学系统采用 γ - γ 符合测量, 为了直接进行对比, 这里数字化系统的数据经过了离线的 γ - γ 符合事件重构), 图中上方曲线代表数字化得到的能谱, 下方曲线代表模拟电子学得到的能谱, 可以看到, 数字化系统在高计数率下具有更好的能量分辨。

2.2 α 衰变谱学

在短寿命原子核的衰变研究中, 衰变信号与注入信号会产生堆积, 使用模拟电子学处理堆积信号容易引起信号的畸变甚至丢失。数字化获取系统通过记录探测器输出的脉冲波形, 在离线分析中可以通过各种算法对叠加脉冲进行处理。

下面以在中国科学院近代物理研究所超重谱仪终

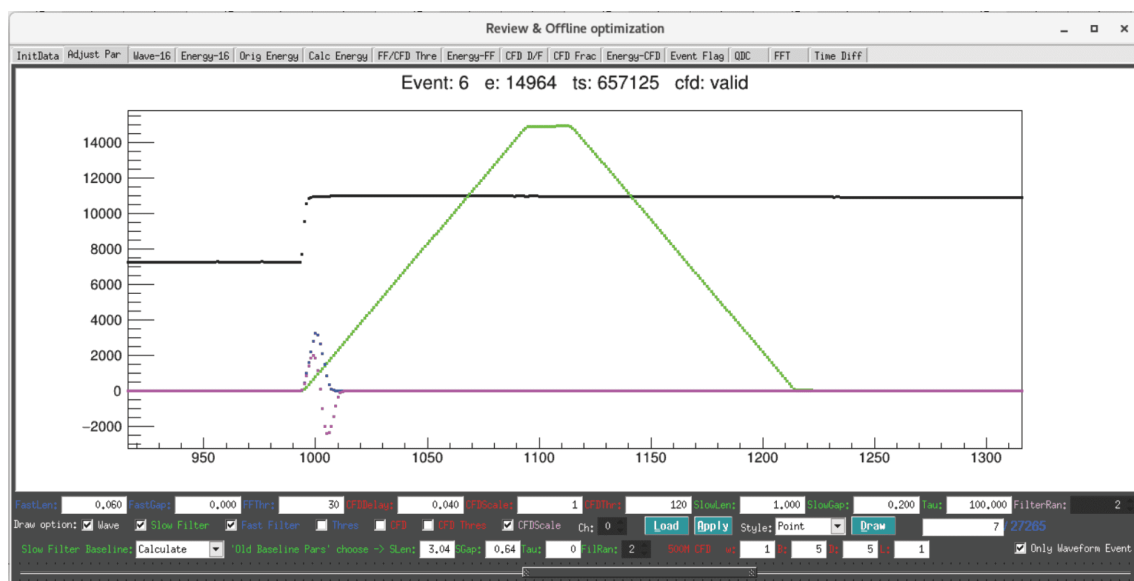


图4 (网络版彩色)离线参数优化图形界面

Figure 4 (Color online) Offline parameters optimization interface

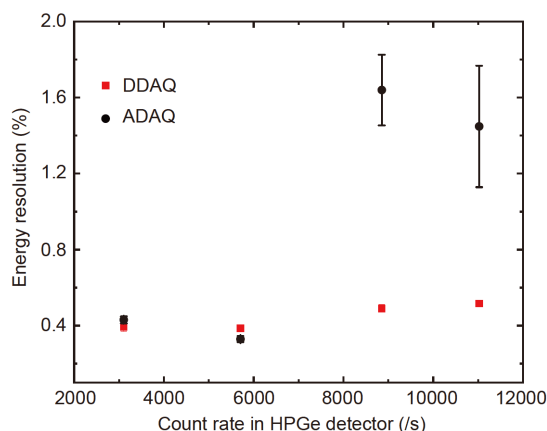


图5 (网络版彩色)模拟和数字化获取系统得到的HPGe探测器能量分辨随输入计数率的变化关系

Figure 5 (Color online) Energy resolutions of the HPGe detector obtained by the analog and digital data acquisition systems as a function of count rate

端上开展的 α 衰变实验为例,介绍在 α 衰变谱学中如何通过合适的算法处理间隔极短的注入信号与衰变信号.实验使用熔合蒸发反应 $^{40}\text{Ar}+^{186}\text{W}$ 产生目标核,以位置灵敏的双面硅微条探测器作为注入探测器,采用100 MHz-14 bit数据采集模块记录粒子在探测器中的波形信号.我们首先利用单能 α 粒子的波形构造探测器的标准脉冲,利用标准脉冲对重离子和 α 叠加脉冲进行

拟合,提取 α 的幅度信息.算法中采用了三角形滤波算法提取脉冲的定时信息,提高了叠加信号的识别率(图7(a)和(b)),并在拟合中排除了脉冲信号的上升沿部分,避免了不同能量的粒子对脉冲形状的影响,该算法能够处理叠加时间很短以及相对幅度差异很大的叠加脉冲.在此次实验中,我们使用短寿命衰变核 $^{219}\text{Th}(T_{1/2}=1.08\text{ }\mu\text{s})$ 和 $^{210,211}\text{Ra}$ 同质异能态($T_{1/2}=2.27, 4.0\text{ }\mu\text{s}$)的叠加脉冲对该算法进行了验证.如图7(c)所示,利用该算法得到的 ^{219}Th 的9340 keV的 α 能量峰的半高宽为32 keV^[13],证明了即使在叠加时间很短(>80 ns)的情况下,利用该算法仍然可以得到很好的能量分辨.同时,对能量大于70 keV的内转换电子,该方法也可以很好地识别并提取相应能量.

3 总结与展望

基于当前国际上已有的数字化获取系统的现状以及国内核物理实验的特点,北京大学实验核物理组开发了一套通用数字化获取系统.该系统通过专门开发的触发插件,支持复杂的触发逻辑,并具有简便易用的离线参数调节以及在线监测系统.该系统大大降低了数字化系统应用的难度,已成功应用于国内外的一系列实验中,例如在中国原子能科学研究院、中国科学

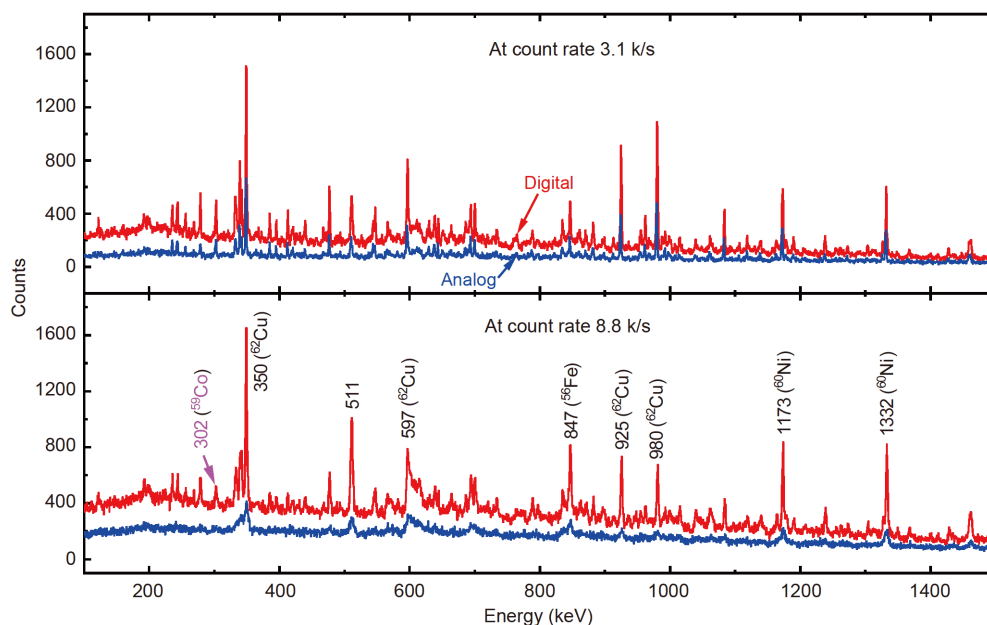


图6 (网络版彩色)在 $^{12}\text{C}+^{54}\text{Cr}$ 反应中,模拟和数字化获取系统在相同时间内测量到的经过多重性 $M\geq 2$ 选择的HPGe探测器的能谱,计数率分别为3.1 k/s (a)和8.8 k/s (b)

Figure 6 (Color online) The typical energy spectra of a HPGe detector probed with multiplicity $M\geq 2$ in the $^{12}\text{C}+^{54}\text{Cr}$ reaction measured by the analog and digital data acquisition systems at count rate 3.1 k/s (a) and 8.8 k/s (b). Two spectra are measured with the same time length

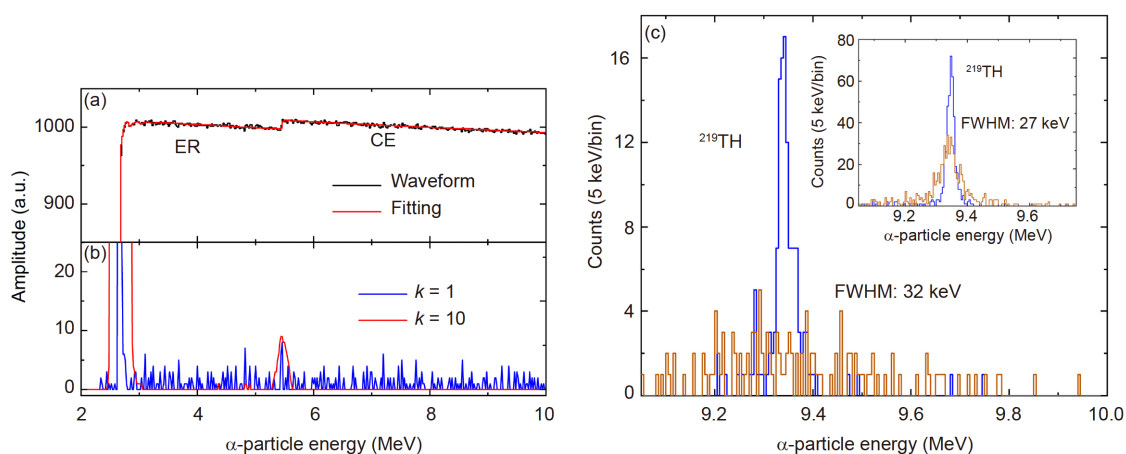


图7 (网络版彩色)叠加脉冲的分解方法^[13]. (a) 一个重离子同质异能态注入信号与其内转换电子衰变信号的叠加脉冲; (b) 利用三角形滤波算法对(a)中波形处理得到的脉冲, 算法的参数取为 $k=1$ 和 $k=10$; (c) 拟合得到的 α 能谱

Figure 7 (Color online) Decomposition method of the pile-up pulse^[13]. (a) A pile-up trace originating from a heavy ion isomer and its subsequent internal conversion electron decay; (b) the corresponding triangular filters with parameters $k=1$ and $k=10$. (c) α energy spectra obtained from the fitting

院近代物理研究所、中国科学院高能物理研究所东莞研究部、南非iThemba LABS等国内外单位的大型实验终端上开展的多个实验中。目前数字化系统应用的一个主要瓶颈在于高精度的时间测量, 为了实现小于采样时间间隔的时间分辨率, 通常采用插值算法, 即采

用一定的函数形式描述相邻两个测量点之间的信号幅度随时间的变化^[14]。在实际应用时, 由于数字化系统的相位差问题, 插值算法的时间性能受到极大的限制^[15,16]。未来, 我们将着眼于解决时间测量相位差问题, 这将促进数字化电子学在快时间测量领域的应用。

参考文献

- Warburton W K, Grudberg P M. Current trends in developing digital signal processing electronics for semiconductor detectors. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2006, 568: 350–358
- Koskelo M J, Koskelo I J, Sielaff B. Comparison of analog and digital signal processing systems using pulsers. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1999, 422: 373–378
- Mitra S, Wielopolski L, Hendrey G. Comparison of a digital and an analog signal processing system for neutron inelastic gamma-ray spectrometry. Appl Radiat Isot, 2004, 61: 1463–1468
- Al-Adili A, Hamsch F J, Oberstedt S, et al. Comparison of digital and analogue data acquisition systems for nuclear spectroscopy. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2010, 624: 684–690
- Hennig W, Tan H, Walby M, et al. Clock and trigger synchronization between several chassis of digital data acquisition modules. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms, 2007, 261: 1000–1004
- Drndarevic V, Ryge P, Gozani T. Digital signal processing for high rate gamma-ray spectroscopy. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1989, 277: 532–536
- Chrien R E, Sutter R J. Noise and pileup suppression by digital signal processing. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 1986, 249: 421–425
- XIA LLC. Pixie-16 User Manual. Version 3.06, 2019
- XIA LLC. Pixie-16 MZ-TrigIO User Manual. Version 0.51, 2019
- Tan H, Momayez M, Fallu-Labruyere A, et al. A fast digital filter algorithm for gamma-ray spectroscopy with double-exponential decaying scintillators. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51: 1541–1545
- Fallu-Labruyere A, Tan H, Hennig W, et al. Time resolution studies using digital constant fraction discrimination. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2007, 579: 247–251
- Wu H Y, Li Z H, Tan H, et al. A general-purpose digital data acquisition system (GDDAQ) at Peking University. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip, 2020, 975: 164200

- 13 Wang X, Li Z H, Liu Z, et al. An effective digital pulse processing method for pile-up pulses in decay studies of short-lived nuclei. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2020, 971: 164048
- 14 Bardelli L, Poggi G, Bini M, et al. Time measurements by means of digital sampling techniques: A study case of 100 ps FWHM time resolution with a 100MSample/s, 12 bit digitizer. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2004, 521: 480–492
- 15 Lipschutz S, Zegers R G T, Hill J, et al. Digital data acquisition for the Low Energy Neutron Detector Array (LEND). *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2016, 815: 1–6
- 16 Prokop C J, Prokop S N, Larson N R, et al. Optimization of the National Superconducting Cyclotron Laboratory Digital Data Acquisition System for use with fast scintillator detectors. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2015, 792: 81–88

Summary for “基于数字化的通用获取系统及波形分析算法”

A general-purpose data acquisition system and a waveform analysis algorithm based on digitization

Hongyi Wu, Zhihuan Li*, Jing Wu, Hui Hua, Xiang Wang, Xiangqing Li & Chuan Xu

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: zhli@pku.edu.cn

Given that the nuclei studied in the nuclear physics experiments are expanding away from the stable nuclear region, traditional analog electronics acquisition systems cannot satisfy the requirements of experiments that involve short-lived, low-yield nucleus productions under high background. In recent years, digital data acquisition systems have shown significant advantages over the analog electronics system and have been widely used in nuclear physics research such as studies of short-lived charged particle emitters which involve overlapping ion-particle or particle-particle signals, and studies of sub-microsecond isomers observed in fragmentation reactions. A general-purpose digital data acquisition system and a dedicated waveform analysis algorithm recently developed by the Group of Experimental Nuclear Physics, Peking University are introduced in this paper.

This digital data acquisition system which is composed of 16-channel digital pulse processor Pixie-16 modules from XIA LLC is a versatile, flexible, and expandable data acquisition system designed for nuclear physics research. Although the triggerless mode, which records all live events without event selection, provides an attractive option for users because it has great flexibility for offline data analysis, it generates significant data streams in the experiments with high counting rates, which may then exceed the digital data acquisition system's I/O capability. Therefore, a flexible trigger system based on the field programmable gate array has been developed to accommodate different experimental needs. The trigger system is configured through the hardware description language (VDHL/verilog), which can set up and debug different experiment logics conveniently. Many offline analysis tools have been developed to help users quickly optimize parameters for various types of detectors without time-consuming tests and measurements.

A comparison between this digital data acquisition system and the conventional analog data acquisition system has been made. At a low count rate, both systems exhibit good and comparable energy resolution. At a high count rate above 8.8 k/s, while the energy resolution obtained by the analog system deteriorates significantly, the energy resolution obtained by the digital data acquisition system remains nearly unchanged. Moreover, experimental data with higher statistics can be collected by the digital data acquisition system. The advantage of this digital data acquisition system over the conventional analog system is ascribed to its excellent capability of handling pile-up pulses at higher count rates, and nearly zero dead time in data transmission and conversion.

An effective digital pulse processing method has been developed for the decomposition of pile-up pulses which result from the signals of μs α decay. This method is able to decompose the multiple pile-up pulses with very close separation in time scale and large range of relative amplitude. The method was validated with the very short-lived α emitter ^{219}Th ($T_{1/2}=1.08\text{ }\mu\text{s}$) and the internal conversion electron decays of $^{210,211}\text{Ra}$ isomers ($T_{1/2}=2.27, 4.0\text{ }\mu\text{s}$) produced by $^{40}\text{Ar}+^{186}\text{W}$. The results show that this method can resolve pile-up pulses with time separation as short as 80 ns. The energy resolution for signals with time separation down to 80 ns is 32 keV. The internal conversion electron decay with energy as low as 70 keV can be well identified.

This digital data acquisition system has been successfully used in many experiments performed at China Institute of Atomic Energy, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Dongguan Campus, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, and South Africa iThemba LABS, and has demonstrated its versatility and high efficiency.

digital data acquisition system, trigger, parameters optimization, waveform analysis

doi: [10.1360/TB-2021-0552](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0552)