

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ НА МЕДЛЕННЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ
С ОЦИФРОВКОЙ ФОРМ ИМПУЛЬСОВР. Б. Подвиянюк¹, В. В. Кобычев¹, Д. Н. Черняк^{1,2}¹Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

Описана спектрометрическая система накопления данных PS⁴TD для ядерно-физических низкофоновых детекторов на медленных сцинтилляторах, разработанная на основе одноплатного 14-разрядного оцифровщика форм импульсов ADC125AS3 с частотой оцифровки 100 МГц, работающего на шине PCI IBM-совместимого персонального компьютера. Программное обеспечение системы реализовано под Windows XP и позволяет проводить онлайн-обработку сцинтилляционных импульсов, строить и анализировать энергетические спектры. Система позволяет улучшить энергетическое разрешение сцинтилляционных спектров по сравнению с традиционными спектрометрами, при этом ее ресурсоемкость значительно меньше.

Ключевые слова: вольфраматы, молибдаты, низкофоновая ядерная спектрометрия, цифровая обработка сигналов.

Введение

Одним из перспективных направлений современной экспериментальной ядерной физики является низкофоновый эксперимент. Это направление связано с поиском и исследованием редких или гипотетических процессов, таких как двойной бета-распад и взаимодействие с веществом частиц темной материи (WIMP, weakly interacting massive particles). Сложность низкофоновой ядерной спектрометрии состоит в том, что на уровне большого числа фоновых событий необходим отбор малого числа полезных событий, которое на порядок меньше фоновых. Это затрудняет применение методов классической ядерной спектрометрии и требует применения систем регистрации и накопления данных на основе оцифровщиков форм импульсов, так как необходимо разделение полезных и фоновых сигналов по форме (в частности, разделение сцинтилляционных сигналов в зависимости от типа частицы, вызвавшей событие). Такие системы регистрации имеют преимущество перед стандартными спектрометрическими системами, так как помимо решения задач ядерной спектрометрии позволяют сохранять файлы форм импульсов и проводить анализ информации после набора данных.

На базе оцифровщиков форм импульсов построены системы регистрации и накопления данных в ряде существующих экспериментов по поиску двойного бета-распада и темной материи DAMA [1], EDELWEISS [2], CDMS [3], CRESST [4], KIMS [5], а также система регистрации в Солотвинской подземной лаборатории (использованная в эксперименте по поиску двойного бета-распада ¹¹⁶Cd [6]). Низкофоновые системы регистрации могут не ограничиваться только трактом оцифровки импульсов, в них также возможно

применение наряду с оцифровщиком и стандартного спектрометрического тракта.

Аппаратная конфигурация низкофоновой системы регистрации и накопления данных на основе оцифровщиков форм импульсов может быть самой различной и зависит от задач эксперимента, но к аналоговому и цифровому трактам предъявляется ряд повышенных требований по шумам и быстродействию. В частности, аналоговый тракт должен обладать низким уровнем собственного шума, а цифровая часть высоким быстродействием, разрядностью и частотой оцифровки для обеспечения наибольшей точности эксперимента. Для разделения полезных и фоновых импульсов на аппаратном уровне оцифровщик формы предполагает использование блока триггеров, который вырабатывает триггер запуска внешней синхронизации процесса оцифровки, используя заложенный в схеме критерий отбора полезных сигналов.

Разработкой оцифровщиков форм импульсов занимаются как мировые лидеры по производству аппаратуры для ядерно-физического эксперимента (Ortec [7], Canberra [8] и др.), так и фирмы, производящие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) широкого назначения. При этом стоимость оцифровщика зависит как от производителя, так и от параметров прибора и может колебаться от сотен до десятков тысяч евро.

Нами была разработана система регистрации и накопления данных PS⁴TD (Pulse Shape Scintillation Spectrometric System for Transient Digitizing) на основе одноплатного 14-разрядного оцифровщика форм импульсов ADC125AS3 с частотой оцифровки 100 МГц, работающего на шине PCI персонального компьютера. Плата производится днепропетровской фирмой «Пульсар» [9]. Система регистрации включает в себя

специализированное программное обеспечение под Windows XP, позволяющее управлять оцифровщиком, проводить онлайн-обработку сигналов, сохранять их на жесткий диск компьютера и строить энергетические спектры. Кроме платы оцифровщика в аппаратную часть спектрометра PS⁴TD входит разработанный нами простой блок триггеров, позволяющий проводить предварительный аналоговый отбор информативных импульсов «медленных» сцинтилляторов и вырабатывать триггеры запуска оцифровщика. Работоспособность спектрометра проверена с детекторами на основе сцинтилляционных кристаллов вольфрамата кальция CaWO₄ [10] и вольфрамата цинка ZnWO₄ [11]. С помощью системы PS⁴TD были измерены энергетические спектры различных гамма-источников и проведено их сравнение со спектрами, набранными с использованием стандартного амплитудного спектрометра.

Структурная схема и принцип работы спектрометра PS⁴TD

Структурная схема системы PS⁴TD изображена на рис. 1. С выхода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) через повторитель, выполненный непосредственно на плате делителя ФЭУ, импульс поступает на аналоговый тракт, состоящий из предварительного усилителя и инвертора с настраиваемым коэффициентом усиления. С выхода инвертора сигнал поступает на вход оцифровщика ADC125AS3, где производится его оцифровка. Параллельно аналоговому тракту сигнал с выхода ФЭУ поступает на вход блока триггеров, который выполняет две функции. Первая из них – отсев неинформативных сигналов (шумы, наводки или сигналы активного световода), вторая – выработка триггера для запуска оцифровщика форм импульсов. Критерий отбора

полезных сигналов – их длительность. Полезные сигналы «медленных» сцинтилляторов, используемых в эксперименте, имеют длительность в десятки микросекунд, в то время как сигналы активного световода – порядка 1 мкс, а шумовые сигналы – менее 1 мкс. Если длительность входного сигнала превышает 2 мкс, сигнал считается информативным и блок триггеров вырабатывает триггер запуска оцифровщика форм импульсов. В противном случае триггер не вырабатывается. В низкофоновом сцинтилляционном эксперименте, как правило, частота шумовых сигналов ФЭУ (и срабатываний активного световода, если он используется) значительно превышает частоту полезных событий, при этом оцифровка импульса занимает относительно большое время. Поэтому применение предварительного аналогового отбора импульсов позволяет уменьшить мертвое время системы регистрации, а также сократить объем сохраняемых данных.

Основные технические характеристики оцифровщика форм импульсов ADC125AS3 [12]

Количество входов АЦП	2
Тип шины обмена данными	PCI32/33
Скорость передачи данных по шине PCI в режиме DMA, МБ/с	100
Разрядность АЦП, бит	14
Максимальная частота дискретизации, МГц	100
Диапазон входного сигнала, В	± 1
Полоса частот входного сигнала, МГц	0 - 100
Интегральная нелинейность преобразования, единиц младшего разряда	± 2,5
Дифференциальная нелинейность преобразования, единиц младшего разряда	± 0,75
Объем внутренней памяти	16 МБ
Входное сопротивление аналогового входа, Ом	50

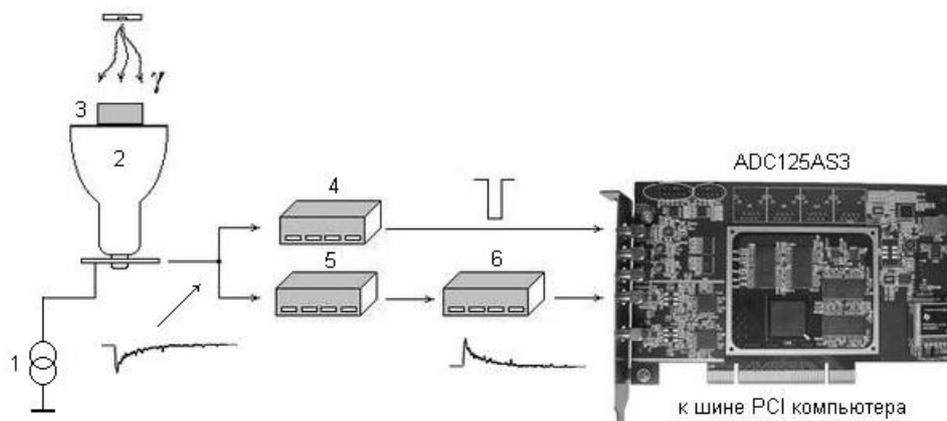


Рис. 1. Структурная схема системы PS⁴TD: 1 – источник высокого напряжения; 2 – низкофоновый фотоэлектронный умножитель Philips XP2412; 3 – сцинтиллятор; 4 – блок триггеров; 5 – предварительный усилитель; 6 – инвертирующий усилитель с настраиваемым коэффициентом усиления.

Была использована модификация платы с входным буфером на операционном усилителе (существует также модификация с трансформаторным входом, развязанным по постоянному току). ADC125AS3 может работать как с внутренним запуском процесса оцифровки (внутренняя синхронизация), так и с внешней синхронизацией путем запуска по переднему фронту внешнего инверсного цифрового сигнала. Оцифрованные данные сохраняются во внутренней буферной памяти платы, а затем по команде или автоматически передаются по DMA (Direct Memory Access) в оперативную память компьютера для обработки. Мертвое время на один импульс в данной конфигурации составляет около 50 мс, что связано с достаточно длительным процессом передачи данных из буфера платы в память компьютера. Хотя предельная скорость набора невысока, но для низкофоновых приложений она более чем достаточна.

Оцифровщик имеет программно настраиваемые функции включения режима внешнего запуска и включения буфера истории длиной 1024 канала. Включение буфера истории возможно только с внешним запуском. Наличие буфера

истории особенно важно в двух отношениях. Во-первых, он позволяет записать базовую линию сигнала (потенциал на входе АЦП перед приходом переднего фронта сигнала), которая необходима для последующей корректной обработки форм импульсов. Во-вторых, при применении внешнего блока триггеров сигнал запуска оцифровщика вырабатывается лишь через несколько микросекунд после прихода переднего фронта сцинтилляционного импульса; без буфера истории начало импульса было бы потеряно.

Частота оцифровки может изменяться программно путем установки целого коэффициента деления частоты тактового генератора платы. Плата оцифровщика имеет встроенные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), которые могут быть задействованы для реализации, например, настроек внешних блоков или генерации сигналов различной формы. С платой оцифровщика поставляются библиотеки под Windows XP для языка программирования Delphi 7, обеспечивающие интерфейс между устройством и пользовательским прикладным программным обеспечением.

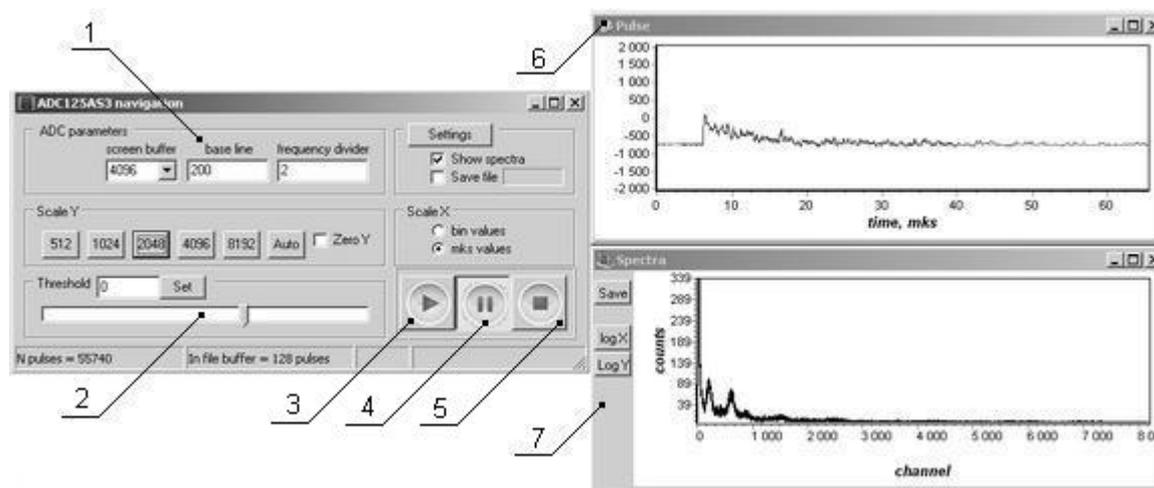


Рис. 2. Программа набора данных: 1 – основные параметры оцифровки: буфер экрана, базовая линия при внутренней синхронизации и делитель частоты оцифровки; 2 – установка порога ДНУ внутренней синхронизации; 3 – кнопка “Старт”; 4 – кнопка “Пауза”; 5 – кнопка “Стоп”; 6 – окно отображения оцифрованного импульса (показан сцинтилляционный импульс $ZnWO_4$); 7 – окно отображения энергетического спектра (показан спектр ^{207}Bi).

Написанная нами программа набора данных (рис. 2) позволяет отображать оцифрованные импульсы, предварительно обрабатывать их, строить энергетические спектры и записывать файлы форм импульсов на жесткий диск компьютера в формате файла PSI. Программно реализованы режимы с внешней и внутренней синхронизацией оцифровщика. Оцифрованный импульс при онлайн-обработке может быть сглажен методом скользящего среднего, а также лишен

высокочастотных составляющих при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Построение энергетических спектров возможно с использованием следующих величин: 1) максимум импульса, 2) интеграл по всей длительности импульса или 3) интеграл по устанавливаемому пользователем промежутку времени от переднего фронта импульса. Пользователь имеет возможность устанавливать значение дискриминатора нижнего уровня (ДНУ) внутреннего запуска

и константы нормировки интегралов импульсов для построения энергетического спектра. Предусмотрена индикация времени начала и конца эксперимента, живого времени и средней частоты импульсов. При записи форм импульсов на жесткий диск компьютера пользователь имеет возможность устанавливать размер буфера записи в оперативную память компьютера (до 128 МБ), в который будут заноситься данные. После заполнения буфера производится запись форм на жесткий диск.

Результаты спектрометрических измерений

Измерения с кристаллом CaWO_4

Исследования выполнялись с монокристаллом CaWO_4 в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $20 \times 20 \times 10$ мм. Длительность сигнала CaWO_4 равна 35 мкс. Частота оцифровки снижена до 50 МГц, что достаточно для сохранения всей интересующей нас информации при меньшей трате вычислительных ресурсов на обработку. Применялась внутренняя синхронизация

с порогом запуска, установленным выше амплитуды шумовых импульсов. При измерениях с этим кристаллом были отработаны методы онлайн-обработки сигналов и построения энергетических спектров. Наиболее оптимальным с точки зрения энергетического разрешения и быстродействия оказалось построение энергетического спектра интегрированием импульса в течение устанавливаемой пользователем длительности. Для кристалла CaWO_4 оптимальная длительность составила 20 мкс при полной длительности импульса 35 мкс. Остальные методы онлайн-обработки сигналов были исключены ввиду недостаточно высокого энергетического разрешения или низкого быстродействия. В табл. 1 представлены результаты обработки гамма-спектра ^{137}Cs , полученного различными методами. Жирным шрифтом отмечены наилучшие результаты по энергетическому разрешению (полная ширина пика на половине высоты (ПШПВ) в процентах к энергии центра тяжести пика).

Таблица 1. Энергетическое разрешение пика ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кэВ) в спектре CaWO_4 при использовании различных методов онлайн-обработки импульсов

Построение спектра	Энергетическое разрешение (ПШПВ) по пику ^{137}Cs ($E_\gamma = 662$ кэВ), %		
	Реальный сигнал	Сглаженный сигнал	БПФ
по максимуму импульса	18,6	16,0	11,9
по интегралу всего импульса, $\tau_{\text{имп.}} = 35$ мкс	7,6	7,4	7,5
по интегралу импульса 20 мкс (при $\tau_{\text{имп.}} = 35$ мкс)	7,5	7,5	9,2

Рассмотрим критерий выбора метода онлайн-обработки сигналов. Для вычисления интеграла сглаженного сигнала необходимо прочитать оцифрованные данные из DMA буфера компьютера, сгладить их методом бегущего среднего и во время сглаживания определить интеграл импульса, т. е. произвести две операции с массивом данных. Для вычисления интеграла сигнала, сглаженного фильтрацией высокочастотных компонент, необходимо прочитать оцифрованные данные из DMA буфера компьютера, выполнить прямое и обратное преобразование Фурье с промежуточным отбрасыванием верхних частот, а затем вычислить интеграл импульса, т. е. произвести с массивом данных четыре операции. Операция вычисления интеграла реального сигнала происходит при чтении оцифрованных данных из DMA буфера компьютера, т. е. за одну операцию с массивом данных. Она и является наиболее быстродействующей и эффективной с точки зрения скорости вычислений. Энергетическое разрешение при этом такое же, как при использовании операций сглаживания и БПФ.

С кристаллом CaWO_4 были измерены энергетические спектры гамма-источников ^{137}Cs , ^{207}Bi , ^{60}Co , ^{232}Th [13]. Результаты измерений представлены на рис. 3. Динамический диапазон системы регистрации вычислялся как отношение максимума шкалы энергетического спектра к центру тяжести линии с минимальной энергией (31 кэВ) и составил примерно 100.

Было проведено сравнение энергетического разрешения пика 662 кэВ ^{137}Cs , измеренного при помощи системы PS^4TD и при помощи стандартного спектрометра со временем формирования сигнала $\tau_\phi = 10$ мкс (оно является оптимальным среди доступного дискретного набора времен формирования; стандартные блоки спектрометрических формирователей, как правило, не позволяют устанавливать время формирования более 10 - 13 мкс). Обработка форм импульсов производилась методом интегрирования импульса в течение устанавливаемой пользователем длительности. Результаты измерений для CaWO_4 представлены в табл. 2 (2-й столбец).

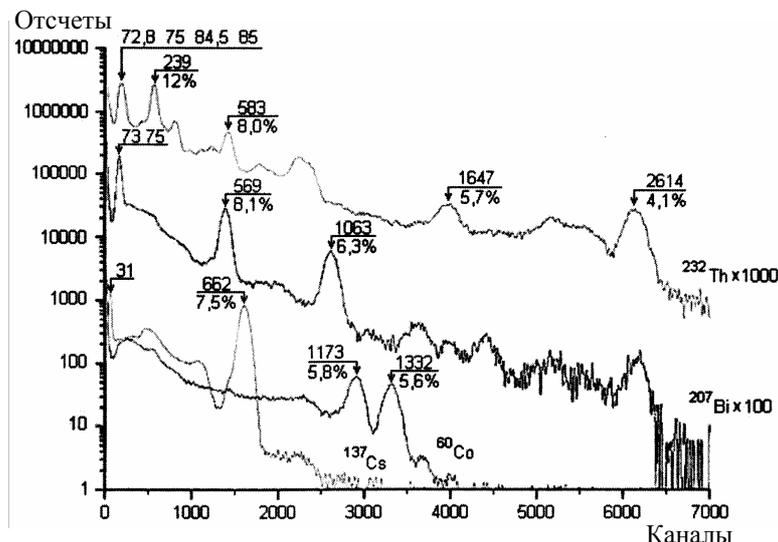


Рис. 3. Энергетические спектры источников ^{137}Cs , ^{207}Bi , ^{60}Co , ^{232}Th , измеренные со сцинтилляционным кристаллом CaWO_4 при помощи системы PS^4TD . Над стрелкой указана энергия гамма-линии, кэВ, под стрелкой – энергетическое разрешение.

Было проведено сравнение энергетического разрешения пика 662 кэВ ^{137}Cs , измеренного при помощи системы PS^4TD и при помощи стандартного спектрометра со временем формирования сигнала $\tau_{\text{ф}} = 10$ мкс (оно является оптимальным среди доступного дискретного набора времен формирования; стандартные блоки спектрометрических формирователей, как правило, не позволяют устанавливать время формирования более 10 - 13 мкс). Обработка форм импульсов производилась методом интегрирования импульса в течение устанавливаемой пользователем длительности. Результаты измерений для CaWO_4 представлены в табл. 2 (2-й столбец).

Таблица 2. Сравнение энергетического разрешения пика ^{137}Cs ($E_{\gamma} = 662$ кэВ), измеренного при помощи стандартного спектрометра и системы PS^4TD , для кристаллов CaWO_4 и ZnWO_4

Система регистрации и накопления данных	Энергетическое разрешение (ПШПВ) по пику ^{137}Cs ($E_{\gamma} = 662$ кэВ), %	
	CaWO_4	ZnWO_4
Стандартный спектрометр, $\tau_{\text{ф}} = 10$ мкс	7,9	11,1
PS^4TD	7,5	10,4

Таким образом, применение онлайн-обработки оцифрованного импульса приводит к улучшению энергетического разрешения по сравнению со стандартным спектрометром.

Измерения с кристаллом ZnWO_4

Измерения проводились с монокристаллом ZnWO_4 в форме куба размерами $10 \times 10 \times 10$ мм. Длительность сигнала ZnWO_4 равна 60 мкс. Для построения энергетических спектров оптималь-

ным отрезком интегрирования, как показали измерения, являются первые 40 мкс импульса. Частота оцифровки по тем же причинам, что и ранее, выбрана равной 50 МГц. Из-за невысокого световых выхода кристалла амплитуда низкоэнергетических сцинтилляционных сигналов может быть меньше или соизмерима с амплитудой шумовых сигналов. При использовании внутренней синхронизации, чтобы избежать регистрации большого числа шумовых импульсов, уровень порога устанавливался выше их амплитуды. Это делало невозможным регистрацию низкоэнергетических сцинтилляционных сигналов (рис. 4). Для их регистрации был применен вышеописанный блок триггеров, позволяющий производить отбор импульсов по длительности и осуществлять внешнюю синхронизацию оцифровщика. Результаты измерений энергетических спектров источников ^{137}Cs , ^{207}Bi и ^{60}Co с применением внешней синхронизации оцифровщика показаны на рис. 5 [14].

Было проведено сравнение результатов измерения спектра ^{137}Cs с внутренней и внешней синхронизацией оцифровщика. Как видно из врезки на рис. 5, отличие энергетических спектров ^{137}Cs состоит в том, что с применением блока триггеров возможна регистрация низкоэнергетических пиков, в частности пика $\text{KX } ^{137}\text{Ba}$ с энергией 31 кэВ, но на разрешение пика с энергией 662 кэВ использование блока триггеров не повлияло.

Сравнение энергетического разрешения пика ^{137}Cs , полученного при помощи спектрометра PS^4TD и стандартного спектрометра со временем формирования сигналов $\tau_{\text{ф}} = 10$ мкс, показано в табл. 2 (3-й столбец). Видно, что применение описываемой системы регистрации и для этого сцинтиллятора также улучшает энергетическое разрешение.

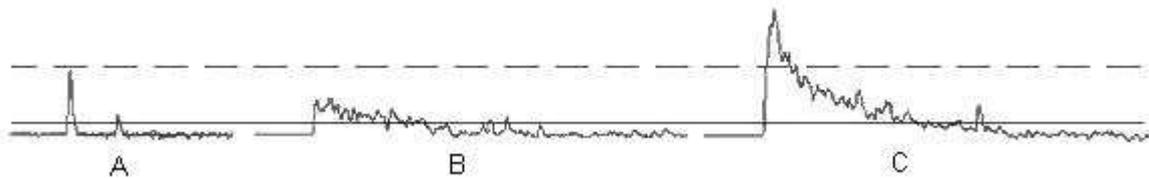


Рис. 4. Дискриминация сигналов с внутренней (штриховая линия) и внешней (сплошная линия) синхронизацией. А – шумовые импульсы длительностью менее 1 мкс, В и С – сцинтиляционные импульсы разной амплитуды. При работе с внешней синхронизацией учитывается длительность сигнала (подробности см. в тексте).

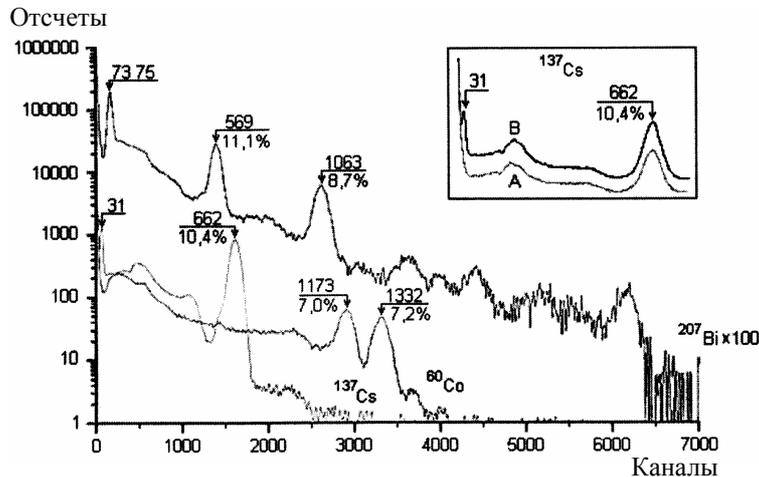


Рис. 5. Энергетические спектры источников ^{137}Cs , ^{207}Bi и ^{60}Co , измеренные со сцинтиляционным кристаллом ZnWO_4 при помощи системы PS^4TD . Над стрелкой указана энергия гамма-линии, кэВ, под стрелкой – энергетическое разрешение. На врезке показаны спектры ^{137}Cs , измеренные с внутренней (А) и с внешней (В) синхронизацией оцифровщика (спектры для наглядности разнесены по вертикали).

Перспективы развития

Во многих низкофоновых экспериментах сцинтиллятор защищают от гамма-излучения радионуклидов, входящих в состав фотоумножителя, с помощью так называемого активного световода, выполненного из сцинтиллятора с отличающимся временем высвечивания; вспышки основного и защитного сцинтиллятора поступают в общий тракт и разделяются по форме. Предварительные эксперименты с применением пластикового активного световода показали, что система PS^4TD хорошо разделяет «быстрые» сигналы пластикового сцинтиллятора и «медленные» сигналы кристалла молибдата кальция (CaMoO_4) [15].

Описанная версия системы PS^4TD в настоящее время лишь частично использует возможности оцифровщика ADC125AS3. В частности, второй канал оцифровщика может быть использован для чтения данных с защитного детектора в системах с активной защитой (наподобие использованного в работе [6]) или для записи фоновых сигналов в криогенных сцинтилляционных болометрах. Два ЦАП, присутствующие на плате ADC125AS3, могут быть применены для осуществления различных аналоговых регулировок внешних устройств, например для управле-

ния порогами дискриминации в блоке триггеров. Цифровые входы платы могут использоваться для регистрации дополнительных параметров события (например, срабатывание защитных мюонных детекторов, детекторов электромагнитных помех и т.п.). Эти возможности планируется использовать в следующих версиях системы.

Обсуждение и выводы

Таким образом, разработанная в отделе физики лептонов ИЯИ НАН Украины спектрометрическая система PS^4TD регистрации и накопления данных для «медленных» сцинтилляционных детекторов, выполненная на основе оцифровщика формы импульсов ADC125AS3 днепропетровской фирмы «Пульсар», позволяет получать высококачественные энергетические спектры. В систему регистрации входит блок триггеров, разделяющий для «медленных» сцинтилляторов полезные и шумовые сигналы по форме и вырабатывающий для полезных сигналов триггер запуска оцифровщика формы импульсов. Блок триггеров, помимо отделения шумов, способен также отсеивать импульсы активного световода, выполненного из пластикового сцинтиллятора. Программное обеспечение, управляющее системой регистрации, позволяет регистрировать импульсы, проводить их первичную обработку, за-

писувати файли форм імпульсів і будувати енергетичні спектри. Роботоспособність системи перевірена тестовими спектрометричними вимірюваннями з джерелами гамма-квантів ^{137}Cs , ^{207}Bi , ^{60}Co , ^{232}Th і детекторами на основі «медленних» сцинтиляційних кристалів (вольфрамату [10], молибдату [15]), які мають різне час висвітлення і світловий вихід. Незважаючи на те, що плата оцифровщика, знаходячись в корпусі комп'ютера і працююча на шині PCI, піддається впливу широкого спектра імпульсних електромагнітних перешкобок і нагріву від сусідніх вузлів, ці фактори не впливали на якість отриманих спектрів: енергетичне розрешення виявляється краще, ніж при використанні традиційної ядерно-фізичної спектрометричної апаратури. Важливим достоїнством системи PS⁴TD є її невисока ціна і простота порівняно

з традиційними спектрометрами, зібраними з стандартних блоків ядерної електроніки, при більшій якості отримуваних спектрів. Відносно низьке швидкодія системи і, відповідно, велике мертве час при високих навантаженнях (від 50 подій в секунду і вище) не є суттєвим недоліком при вимірюваннях з малою швидкістю лічби, характерною для низькошумових експериментів. Порівняно з позначеними вище спектрометрами, використаними в ряду низькошумових експериментів, система відрізняється простотою і невисокою ресурсомісткістю при близькій функціональності.

Робота частково підтримана проектом «Космомікрофізика» НАН України. Автори вдячні співробітникам ООО «Пульсар» за корисні обговорення і консультації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bernabei R., Belli P., Montecchia F. et al.* Dark Matter signals: from underground to space investigation // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). - 2007. - Vol. 166. - P. 87 - 95.
2. *Benoit A., Bergé L., Bluemer J. et al.* Sensitivity of the EDELWEISS WIMP search to spin-dependent interactions // Phys. Lett. B. - 2005. - Vol. 616. - P. 25 - 30.
3. *Akerib D. S., Attisha M. J., Bailey C. N. et al.* The SuperCDMS proposal for dark matter detection // Nucl. Instr. Meth. A. - 2006. - Vol. 559. - P. 411 - 413.
4. *Angloher G., Bucci C., Christ P. et al.* Limit on WIMP dark matter using scintillating CaWO_4 cryogenic detectors with active background suppression // Astropart. Phys. - 2005. - Vol. 23. - P. 325 - 333.
5. *Lee H. S., Bhang H. C., Choi J. H. et al.* Limits on Interactions between Weakly Interacting Massive Particles and Nucleons Obtained with CsI(Tl) Crystal Detectors // Phys. Rev. Lett. - 2007. - Vol. 99. - P. 091301, 4 p.
6. *Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychiev V. V. et al.* Search for 2β decay of cadmium and tungsten isotopes: Final results of the Solotvina experiment // Phys. Rev. C. - 2003. - Vol. 68. - P. 035501, 12 p.
7. *Ortec Model 9353 100-ps Time Digitizer / MCS* [Електронний ресурс]. - <http://www.ortec-online.com/electronics/ctr/9353.htm>. - Загл. с екрана.
8. *Canberra Model 8715 Analog-to-Digital Converter* [Електронний ресурс]. - http://www.canberra.com/pdf/Products/NIM_pdf/8715_SS.pdf. - Загл. с екрана.
9. *Hardware Design Experience in Pulsar, Ltd.* [Електронний ресурс]. - http://hi-tech.org.ua/files/PULSAR_3_2007.pdf. - Загл. с екрана.
10. *Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychiev V. V. et al.* Scintillation pulse shape discrimination with CaWO_4 , ZnWO_4 , and CdWO_4 crystals // Functional Materials. - 2005. - Vol. 12. - P. 269 - 273.
11. *Danevich F. A., Kobychiev V. V., Nagorny S. S. et al.* ZnWO_4 crystals as detectors for 2β decay and dark matter experiments // Nucl. Instr. Meth. A. - 2005. - Vol. 544. - P. 553 - 564.
12. *Руководство разработчика, программные модули и библиотеки, примеры программ для оцифровщика форм импульсов ADC125AS3* [Електронний ресурс]: інформ. система на компакт-диску. - 2007. - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
13. *Zdesenko Yu. G., Avignone F. T., Brudanin V. B. et al.* CARVEL experiment with $^{48}\text{CaWO}_4$ crystal scintillators for the double β decay study of ^{48}Ca // Astropart. Phys. - 2005. - Vol. 23. - P. 249 - 263.
14. *Kraus H., Danevich F. A., Henry S. et al.* ZnWO_4 scintillators for cryogenic dark matter experiments // Nucl. Instr. Meth. A. - 2009. - Vol. 600. - P. 594 - 598.
15. *Annenkov A. N., Buzanov O. A., Danevich F. A. et al.* Development of CaMoO_4 crystal scintillators for double beta decay experiment with ^{100}Mo // Nucl. Instr. Meth. A. - 2008. - Vol. 584. - P. 334 - 345.

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ НА ПОВІЛЬНИХ СЦИНТИЛЯТОРАХ З ВІДЦИФРУВАННЯМ ФОРМ ІМПУЛЬСІВ

Р. Б. Подвіяннюк, В. В. Кобычев, Д. М. Черняк

Описано спектрометричну систему накопичення даних PS⁴TD для ядерно-фізичних низькошумових детекторів на повільних сцинтиляторах, розроблену на основі одноплатного 14-розрядного відцифрувальника форм імпульсів ADC125AS3 з частотою відцифрування 100 МГц, який працює на шині PCI IBM-сумісного персонального комп'ютера. Програмне забезпечення системи реалізовано під Windows XP та дозволяє проводити он-

лайнну обробку сцинтиляційних сигналів, будувати та аналізувати енергетичні спектри. Система дає змогу покращити енергетичну роздільну здатність сцинтиляційних спектрів порівняно з традиційними спектрометрами, при цьому її ресурсоємність значно менша.

Ключові слова: вольфрамат, молібдат, низькофонова ядерна спектрометрія, цифрова обробка сигналів.

SPECTROMETER FOR SLOW SCINTILLATION DETECTORS WITH PULSE SHAPE DIGITIZING

R. B. Podviyanuk, V. V. Kobychyev, D. N. Chernyak

PS⁴TD data acquisition system for nuclear physical low background detectors on slow scintillators is described. The system is based on the ADC125AS3 14-bit 100 MHz digitizer board operating on the PCI bus of IBM compatible personal computer. The software of the system is realized under Windows XP and allows to process scintillation signals online, to build and to analyze energy spectra. The data acquisition system improves energy resolution of scintillation spectra as compared to conventional spectrometers and is significantly less expensive.

Keywords: tungstates, molybdates, low-counting nuclear spectrometry, digital signal processing.

Поступила в редакцію 11.06.09,
после доработки – 06.11.09.