

Цифровой метод совпадений

В. И. ЧЕРНЫШЕВ, С. В. КОРОСТИН, Ю. Н. МАРТЫНЮК, А. С. ТРОФИМОВ,
П. А. ИОРДАНСКИЙ

Описана реализация цифрового метода совпадений, в котором оцифровывается амплитуда и фиксируется время каждого импульса, поступающего с детекторов ионизирующих излучений. Подробно рассмотрены особенности обработки цифровой амплитудно-временной измерительной информации. Показано, что цифровой метод совпадений имеет временное разрешение, определяемое только разрешающей способностью детекторов.

Ключевые слова: цифровой метод совпадений, спектр совпадений, обработка цифровых данных, измерение активности радионуклидов.

Technique of digital coincidence counting (DCC) in which both amplitude and time of appearing of each impulse coming in from ionization radiation detectors digitized is described. The peculiarities processing of digital amplitude-time data are carefully considered. It is shown that DCC has time resolution determined only by resolution of the detectors.

Key words: digital coincidence method, coincidence spectrum, digital data processing, measurements of radioactivity.

Метод совпадений является одним из основных в экспериментальной ядерной физике. Он позволяет выделять события, зарегистрированные детекторами «одновременно», т. е. находящиеся в пределах определенного разрешающего времени. Метод совпадений широко применяется в исследова-

ниях схем распада радионуклидов, нейтронной физике, изучении ядерных реакций и т. д. [1]. Особую роль метод совпадений играет в метрологии радионуклидов. Установки, реализующие метод совпадений, являются основой многих национальных эталонов [2].

В настоящее время совпадения между импульсами, поступающими с детекторов, определяются с помощью аналоговых модулей, которые включают в себя одноканальные анализаторы, линии задержки, блок совпадений, пересчетные устройства и т. д. Современный уровень развития цифровой и компьютерной техники позволяет измерять амплитуду и время появления каждого из поступающих с детекторов импульса с последующим преобразованием результатов измерений в цифровой код и их запись в память персонального компьютера. Затем сохраненная информация может быть проанализирована на наличие совпадений. Получаемый результат меньше зависит от стабильности и воспроизводимости параметров электроники, поскольку многие аналоговые модули становятся ненужными. Кроме того, сохраняемая на жестком диске информация носит первичный характер, что позволяет применять и сравнивать различные методы статистической обработки.

Цифровой метод совпадений является относительно новым и известно небольшое число публикаций по этой теме. В [3] описана система, которая обрабатывает в режиме реального времени результаты измерений напряжений, проводимых при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с тактовой частотой таймера 20 МГц. Из-за большого объема получаемой информации эта система представляет собой достаточно сложный программно-аппаратный комплекс. Система, описанная в [4], является более простой аппаратной реализацией цифрового метода совпадений и состоит из двух независимых АЦП, таймера с частотой 10 МГц и 40 Мбайт памяти SRAM.

Обзор применения цифровых методов совпадений в метрологии радионуклидов приведен в [5].

Ниже описана программно-аппаратная реализация метода цифровых совпадений. Большое внимание уделено сбору измерительной информации компьютером и ее последующей обработке, поскольку в цифровом методе они носят принципиальный характер.

Двухходовый измерительный модуль представляет собой плату, вставляемую в разъем ISA обычного IBM/PC совместимого компьютера. На плате смонтированы два независимых десятибитных пиковых АЦП (по 1024 канала), буфер на два измерения (по одному на вход) и таймер с погрешностью дискретизации 20 нс (калиброванный генератор на 50 МГц). При поступлении импульса на любой из входов плата фиксирует его амплитуду и время в буфере и вырабатывает сигнал прерывания компьютеру IRQ. Время поступления сигнала на модуль отсчитывается от начала измерений и фиксируется по превышению минимального порогового уровня 50 мВ. Отметим, что схемы АЦП независимы по обоим входам платы, а наличие одного таймера позволяет проводить измерения времени по обоим входам в единой шкале.

В работе использован компьютер с процессором Celeron с тактовой частотой 366 МГц и ОЗУ 128 Мбайт SDRAM. Следует подчеркнуть, что наш измерительный модуль не предъявляет каких-либо особых требований к компьютеру.

Сбор измерительной информации. Для управления системой и сбора данных была написана программа DigiRec, которая обрабатывает прерывание и записывает полученные данные в оперативное запоминающее устройство, а затем на жесткий диск. Спецификой программы являлась необходимость обеспечения минимальных задержек при обработке прерываний.

В качестве языка программирования и среды разработки был выбран Borland Pascal 7.0. С одной стороны, этот

компилятор дает возможность делать вставки в машинных кодах и на ассемблере (что позволяет писать машинно-ориентированный быстрый код), с другой — может создавать код защищенного режима (что позволяет рационально использовать всю доступную оперативную память).

Основу программы DigiRec составляют обработчики аппаратных прерываний, вырабатываемых системой. Созданные по симметричной схеме они работают независимо друг от друга, ожидая своего прерывания, соответствующего регистрации импульса измерительным модулем. Как только возникает прерывание, соответствующий обработчик считывает коды показаний времени прихода и амплитуды импульса с буферных регистров устройства и без всякой дополнительной обработки записывает их в предварительно распределенную оперативную память. По результатам измерений формируется текстовый файл с результатами эксперимента.

Программа DigiRec работает в OS DOS. Это позволяет минимизировать время переноса информации от внутренних буферов платы, что является составной частью мертвого времени системы. Используются два варианта компиляции и работы программы:

1. *Компиляция в программу защищенного режима (protected mode).* При этом программа может работать только с менеджером DPMI (DOS Protected Mode Interface) и имеет возможность напрямую адресовать всю доступную оперативную память. В нашем случае это 128 Мбайт, что соответствует примерно 6552000 измерениям, так как информация о каждом импульсе занимает 8 байт. В защищенном режиме проводится больше операций при обработке прерываний, что обуславливает большее мертвое время комплекса в этом режиме.

2. *Компиляция в программу реального режима (real mode).* В режиме реального времени программа не может напрямую обращаться к оперативной памяти выше адреса 1024 Кбайт, поэтому максимальное число измерений, обрабатываемых программой в этом режиме, составляет примерно 72000. Однако скорость обработки прерываний и обращения к памяти в этом режиме максимальна, что обуславливает меньшее мертвое время. Для запуска программы в этом режиме используется «чистая» загрузка DOS, так как некоторые драйверы (например, emm386.exe) существенно увеличивают время обработки.

Мертвое время является одним из основных параметров установок, реализующих метод совпадений [6]. Поскольку во время сбора информации модуль и компьютер работают в едином комплексе, мертвое время складывается из двух составляющих: *аппаратного мертвого времени*, определяемого временем работы АЦП, задержками при формировании управляющих сигналов прерываний и т. п.; *программного мертвого времени*, обусловленного работой компьютера в программе DigiRec в процессе сбора данных. Измерения мертвого времени проводились генератором двояных импульсов и специальными программами.

Измерения генератором двояных импульсов позволили определить полное мертвое время программно-аппаратного комплекса. Чтобы вычислять программную составляющую мертвого времени обоих вариантов программы DigiRec, была написана тестовая программа, которая измеряет время обработки одного миллиона процедур прерывания. Кроме того, серия измерений с программами, функционально-идентичными измеряющей программе DigiRec, но с удвоенной и утроенной процедурой обработки прерывания, позволила уточнить аппаратную составляющую мертвого време-

ни. Стандартную неопределенность измерений рассчитывали в соответствии с [7]. Результаты представлены в таблице.

Составляющие мертвого времени

Мертвое время	Значение мертвого времени при различных режимах работы компьютеров, мкс	
	real-mode	protected-mode
Полное	$16,8 \pm 0,1$	$29,8 \pm 0,4$
Программное	$9,3 \pm 0,1$	$22,1 \pm 0,1$
Аппаратное	$7,7 \pm 0,7$	$7,7 \pm 0,7$

Алгоритм обработки измерительной информации. Для обработки записанной на жесткий диск компьютера амплитудно-временной информации была создана интерактивная программа OpenTable в среде MathCAD. Программа

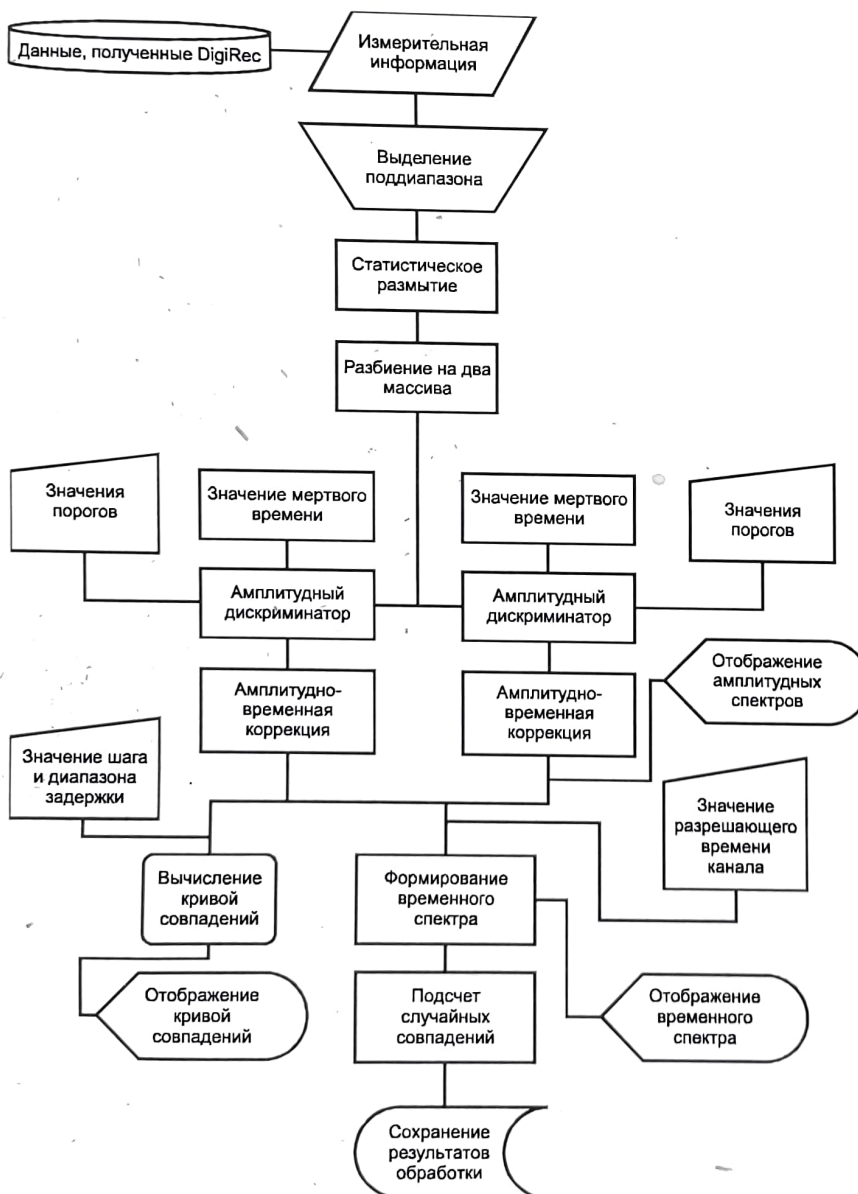


Рис. 1. Алгоритм обработки данных

OpenTable обрабатывает файлы данных, подготовленные программой DigiRec. В режиме предварительного просмотра пользователь может «вырезать» любой поддиапазон данных или составить новую таблицу из выбранных заранее частей. Полученная таблица разбивается программой на два массива данных, соответствующих измерениям по входам. Затем данные обрабатываются фильтрами, которые условно можно разделить на две группы: для обработки данных, поступающих с детекторов, и для формирования канала совпадений.

После обработки данных всеми фильтрами программа вычисляет уточненные средние скорости импульсов во всех каналах (рис. 1).

Проверку корректности обработки амплитудно-временной информации проводили на примере $4\pi\beta - \gamma$ -совпадений с использованием вторичного эталона активности радионуклидов ВЭТ 6-1—75.

Обработка информации, поступающей с детекторов. Предварительная обработка данных осуществляется двумя программными фильтрами и процедурой статистического размытия. Первый фильтр — настраиваемый амплитудный дискриминатор. Он позволяет выделить из потока только те импульсы, которые удовлетворяют условию установленного для каждого входа возможного диапазона уровней сигнала. Второй — фильтр мертвого времени. Он удаляет импульсы, интервал следования между которыми меньше заданного в программе.

Включение в обработку данных процедуры статистического размытия вызвано двоичной природой информации, получаемой с комплекса. Это обусловлено тем, что в нашем комплексе обе шкалы — времени и амплитуд — имеют дискретный характер, определяемый частотой таймера (50 МГц) и разрядностью АЦП (10 бит). При математической обработке такой информации существенной становится ее дихотомичная структура, которая проявляется уже при построении амплитудного спектра сигнала с одного из детекторов (например, пропорционального счетчика). При задании произвольного числа каналов отображения возникает картина, показанная на рис. 2, а. Аналогичная ситуация возникает при построении любых спектров как амплитудных, так и временных. Наблюдаемые вертикальные полосы или другие характерные периодические неоднородности образуются вследствие различной информационной ширины каналов.

Поясним на примере. Допустим, аналоговый сигнал, равномерно распределенный в диапазоне (0—3) В, преобразован двухбитным АЦП так, что 0 соответствует диапазону (0—1) В; 1 — диапазону (1—2) В; 2 — диапазону (2—3) В; 3 — диапазону (3—4) В. При построении спектра с четырьмя визуальными измерительными каналами, совпадающими с возможным числом измеряемых величин (от нулевого — минимум до четвертого — максимум), получим четы-

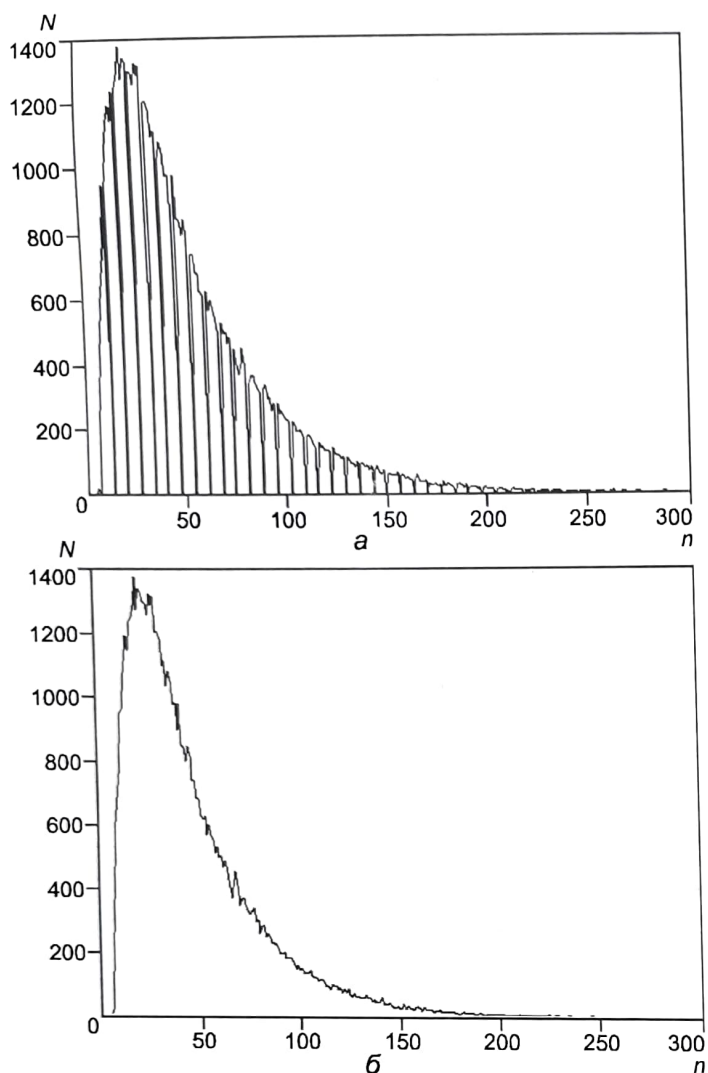


Рис. 2. β -спектры (N — число отсчетов, n — номер канала):
а — разбиение на 300 каналов; б — разбиение на 300 каналов
со статистическим размытием

ре одинаковые линии. Однако если будет три визуальных канала, то получим две одинаковые линии и одну в два раза больше. А если имеем пять визуальных каналов, то в одном из них получим 0. Амплитуда биений может быть значительной даже для большого количества возможных числовых значений исходного сигнала. Анализ подобных спектров может привести к ошибочным выводам о характеристиках исходного сигнала.

Типичное решение задачи состоит в выборе подходящего числа каналов спектра. Необходимый критерий выбора — одинаковое количество возможных цифровых значений в каждом канале. Например, при 256 каналах в спектре полностью отсутствуют какие-либо периодические неоднородности, и спектр выглядит подобно изображенному на рис. 2, б. Однако поскольку математическая обработка входной информации в цифровом методе совпадений намного сложнее, чем визуализация спектра исходных значений, в некоторых случаях выбор оптимального числа каналов (а точнее их ширины) — некорректная или даже невыполнимая задача.

В общем случае для решения проблемы дискретности исходного сигнала можно провести его статистическое размытие. Для этого к каждому измеряемому параметру добавляется случайное число в диапазоне от 0 до ΔI или от $-\Delta I/2$ до $\Delta I/2$, где ΔI — минимально возможный шаг квантования. Случайное распределение в абсолютном большинстве случаев должно быть равномерным. Исключением могут быть измерения с малым числом или нелинейными характеристиками каналов измерения. Такое размытие практически очень мало влияет на точность результата измерений, поскольку вносимая неопределенность не превышает цены деления шкалы (шага квантования).

В нашей процедуре к измеренному интервалу времени добавлялась случайная задержка от 0 до 20 нс, а к амплитуде сигнала — случайное значение от 0 до 256. В результате получается спектр, показанный на рис. 2, б. Процедура статистического размытия проводится программой OpenTable до обработки данных всеми последующими фильтрами. Отметим, что искажения результатов обработки из-за дискретности величин носят принципиальный характер и относятся к обработке любой цифровой информации.

Формирование канала совпадений происходит с помощью специального фильтра и процедуры амплитудно-временной коррекции. Фильтр выделяет из массива данных импульсы разных каналов, совпадающие по времени с точностью до разрешающего времени. Для выбора разрешающего времени формируется временной спектр совпадений (распределение импульсов в зависимости от временного

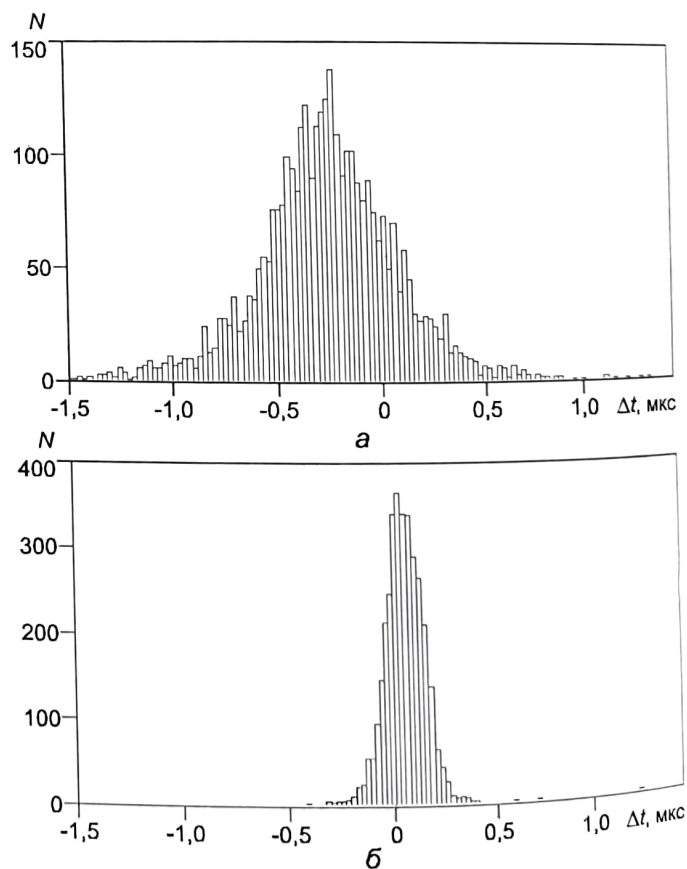


Рис. 3. Временные спектры совпадений (N — число отсчетов, Δt — интервал между импульсами):
а — без амплитудно-временной коррекции; б — с амплитудно-временной коррекцией

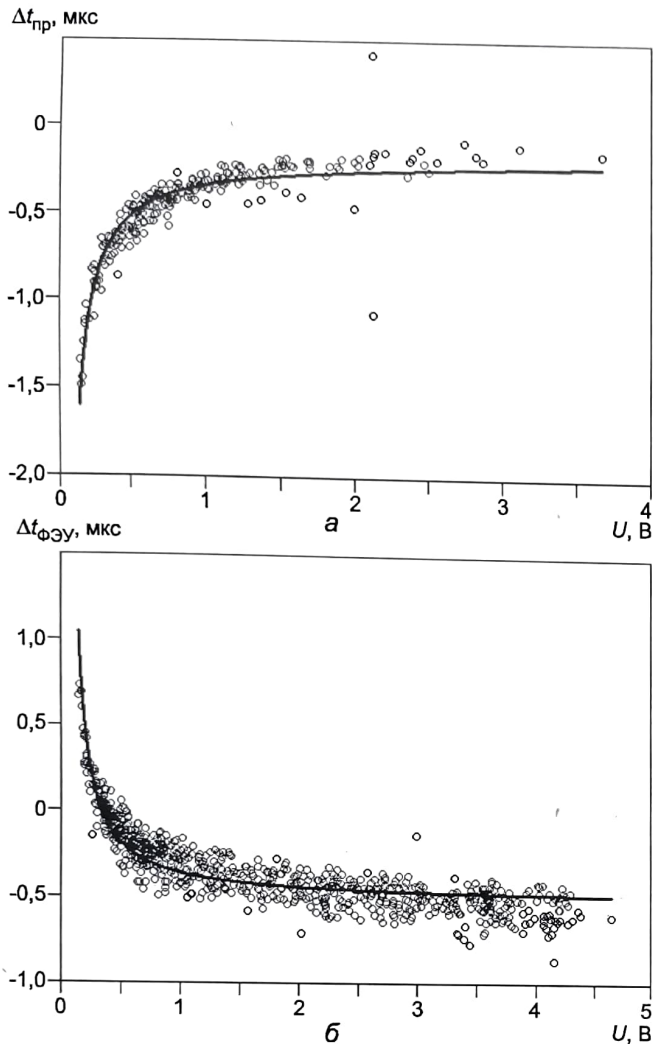


Рис. 4. Зависимости временной задержки импульсов от амплитуды:

а — для пропорционального счетчика $\Delta t_{\text{пр}}$; б — для сцинтилляционного детектора $\Delta t_{\text{ФЭУ}}$

интервала между ними). Для этого вычисляется интервал времени между импульсами в разных каналах в пределах исследуемого диапазона и строится гистограмма их распределения (рис. 3, а).

Программа позволяет также в случае необходимости получать кривую совпадений (зависимость скорости счета в канале совпадений от времени задержки в каждом из каналов). При этом к значениям интервала времени одного из каналов прибавляется задержка с шагом, задаваемым оператором, и вычисляется скорость счета в канале совпадений. Полученное число запоминается в массиве, и операция повторяется в цикле.

Процедура амплитудно-временной коррекции позволяет повысить точность измерений времени регистрации импульса. В нашем комплексе отметка времени прихода импульса с детектора осуществляется методом привязки к пороговому уровню (50 мВ). Известно, что при этом возникает неопределенность измерения времени регистрации импульса из-за конечной крутизны фронта (см., например, [6]). Это приводит к тому, что появляется зависимость регистри-

руемого времени прихода импульсов от амплитуды. Импульсы, формируемые усилителями комплекса, имели длительность переднего фронта около 0,5 мкс.

Получаемая амплитудно-цифровая информация позволяет проанализировать форму переднего фронта импульса и ввести соответствующую поправку к регистрируемому времени прихода импульсов [8]. Для этого фиксацией программными дискриминаторами амплитуд в одном из каналов были получены зависимости задержки в канале совпадений от амплитуды в другом канале (рис. 4). Эти зависимости определяются формами передних фронтов импульсов и являются их обратными функциями.

Для пропорционального счетчика, используемого в измерениях, зависимость переднего фронта импульса напряжения на аноде описывается выражением [9]:

$$U = U_0 \left(\ln \frac{t}{\tau} + 1 \right).$$

Для ФЭУ форма переднего фронта приближенно выражается формулой [9]:

$$U = U_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right).$$

Учитывая преобразования сигналов по пути следования к плате сбора информации, получаем время задержки для пропорционального счетчика

$$\Delta t_{\text{пр}} = \Delta t_{0\beta} - \tau_{\beta} \ln \left(1 - \frac{U_{\beta}}{U_{0\beta}} \right),$$

для ФЭУ

$$\Delta t_{\text{ФЭУ}} = \Delta t_{0\gamma} + \tau_{\gamma} e^{\frac{U_{\gamma}}{U_{0\gamma}} - 1}.$$

Таким образом, разница времени Δt между сигналами в формируемом канале совпадений, обусловленная формой импульсов, будет

$$\Delta t = \Delta t_0 - \tau_{\beta} \ln \left(1 - \frac{U_{\beta}}{U_{0\beta}} \right) - \tau_{\gamma} e^{\frac{U_{\gamma}}{U_{0\gamma}} - 1}, \quad (1)$$

где U_{β} , U_{γ} — амплитуды напряжений измеряемых сигналов в β - и γ -каналах; Δt_0 , τ_{β} , $U_{0\beta}$, τ_{γ} , $U_{0\gamma}$ — неизвестные коэффициенты, обусловленные конкретным режимом работы детекторов.

Подбор коэффициентов уравнения (1) осуществляли методом Левенберга — Марквардта в пакете MathCAD. В качестве параметра минимизации было выбрано среднее квадратическое отклонение (СКО) интервалов времени между импульсами, попадающими в канал совпадений. Полученные значения $\Delta t_{\text{пр}}$ и $\Delta t_{\text{ФЭУ}}$ автоматически вносились в виде поправок к каждому измеренному комплексом времени прихода импульса.

В результате стандартное отклонение интервалов между импульсами при совпадениях снизилось почти в три раза (с 3,4 до 1,2 мкс), что хорошо видно на временном спектре (см. рис. 3, б). По своему порядку СКО совпадает с временным разрешением пропорционального счетчика, обусловленным временем дрейфа электрона в газе. Таким обра-

зом, вводимая программой амплитудная коррекция времени позволяет получать разрешающее время, определяемое разрешающей способностью применяемых детекторов.

Анализ формируемого канала совпадений позволяет непосредственно оценить количество случайных совпадений [4]. Для этого подсчитывалось количество импульсов в каналах временного спектра, далеких от совпадений. В наших измерениях количество случайных совпадений составляло не более 0,5 % общего числа совпадений.

Заключение. В статье описаны основные подходы к обработке дискретной амплитудно-временной информации и формированию канала совпадений для получения достоверных результатов в цифровом методе совпадений. Дальнейший анализ информации зависит от конкретного приложения метода.

Для улучшения аппаратной части метода возможна установка собственной памяти в измерительный модуль и изменение типа АЦП. Это позволило бы свести к минимуму мертвое время.

В данной работе цифровой метод совпадений применялся для абсолютного измерения активности слабоактивных источников (не более 10^4 Бк). При соответствующих низких нагрузках мертвое время мало влияет на точность измерений. Кроме того, имеется возможность учитывать просчеты при обработке данных.

К недостаткам системы можно отнести отсутствие возможности отображения результата в процессе эксперимен-

та. Но, как показывают полученные результаты, обработка информации является самостоятельной задачей и целесообразней проводить ее отдельно.

Л и т е р а т у р а

1. **Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия** / Под ред. К. Зигбана. — М.: Атомиздат, 1969.
2. **Юдин М. Ф. и др.** Измерение активности радионуклидов. — Екатеринбург: Полиграфист, 1999.
3. **Butcher K. S. A. e. a.** // Nucl. Instrum. and Methods. A. — 2000. — V. 450. — P. 30.
4. **Hwang H. Y. e. a.** // Nucl. Instrum. and Methods. A. — 1998. — V. 413. — P. 228.
5. **Чернышев В. И., Коростин С. В.** // АНРИ. — 2003. — № 4 (35). — С. 50.
6. **Рехин Е. И., Чернов П. С., Басиладзе С. Г.** Метод совпадений. — М.: Атомиздат, 1979.
7. **Руководство** по выражению неопределенности измерения / Под ред. А. В. Слаева. — СПб: ВНИИМ, 1999.
8. **Khamzin M. K., Valentine J. D.** // Nucl. Instrum. and Methods. A. — 2003. — V. 505. — P. 358.
9. **Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С.** Основы экспериментальных методов ядерной физики. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

Дата одобрения 17.08.2004 г.