

На правах рукописи

ЧЕРНЫШЕВ ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО МЕТОДА СОВПАДЕНИЙ
ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ**

Специальность 05.11.15
Метрология и метрологическое обеспечение

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Менделеево, 2008 г.

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Физико-Технических и Радиотехнических Измерений»

Научные руководители:

Доктор технических наук,
профессор Ярына Владимир Петрович

Кандидат физико-математических наук,
Коростин Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор Трошин Владимир Сергеевич

кандидат технических наук Нурлыбаев Кубейсин Нурлыбаевич

Ведущая организация Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И.Менделеева (ВНИИМ)

Защита состоится 24 июля 2008 года в 14 часов
на заседании диссертационного совета ВНИИМС Д308.001.01
по адресу:
г. Москва, ул. Озерная, д. 46, комн. 1005

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИИМС

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук Лысенко В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Последние десятилетия международным сообществом уделяется большое внимание радиационной безопасности (РБ) среды обитания человека. Основу РБ составляет достоверная информация о дозовых нагрузках на людей (персонал и население), которые обусловлены как внешним облучением от источников, так и внутренним облучением от попадания в организм радиоактивных веществ с воздухом, водой, продуктами питания. И не случайно радиационный мониторинг природно-техногенной сферы и радиационно-гигиенических условий существования человека при несколько различающихся формулировках проблемы всегда относится к критическим технологиям РФ.

Метрологическое обеспечение радиэкологических измерений базируется на воспроизведении единицы активности радионуклидов, при этом радиометрический метод совпадений занимает принципиально важное место.

Метод совпадений в радиометрии – это метод абсолютного измерения активности радионуклидов, распадающихся с одновременным испусканием различных видов излучений, которые могут быть зарегистрированы по раздельности и одновременно (совпадения).

Радиометрические установки, основанные на методе совпадений, являются основой национальных эталонов многих стран, в том числе в России. Самой точной является т.н. $4\pi(\alpha\beta X)\text{-}\gamma$ модификация метода совпадений, в которой используются 4π -пропорциональный счетчик, регистрирующий α , β или рентгеновское (X) излучение и сцинтилляционный счетчик, регистрирующий γ - излучение.

В настоящее время, эталонные установки используют только аналоговый метод совпадений.

Аналоговый метод совпадений – это реализация метода совпадений с применением аналоговой электронной техники (одноканальные анализаторы, блок совпадений, линии задержки и т.д.). При этом регистрация импульсов, поступающих с детекторов излучений и с блока выделения совпадений, и их амплитудная селекция осуществляется в реальном времени.

Аналоговая электроника требует точной настройки с учётом схем распадов конкретных измеряемых радионуклидов. Помимо обычных в практике радиометрических и спектрометрических измерений установки параметров усилителей и амплитудных дискриминаторов, требуется также определение временных параметров аппаратуры, играющих важную роль в методе совпадений и учитывающихся в виде поправок при вычислении активности измеряемого источника.

Мёртвое время – это временной интервал, следующий за зарегистрированным событием, во время которого установка становится нечувствительной для другого отсчета. Мёртвое время определяет просчеты частиц в измерительных каналах. Для определения мёртвого времени необходимо проводить серию из минимум трех измерений с контрольными источниками.

Разрешающее время схемы совпадений – временной интервал, во время которого события, зарегистрированные в каналах, считаются совпадающими. Величина разрешающего времени определяет количество случайных, т.е. несвязанных с актами распада, совпадений, зарегистрированных установкой. В аналоговом методе совпадений разрешающее время определяется параметрами электронного блока совпадений. Для корректного учета разрешающего времени в поправках при вычислении активности необходимо измерение его фактического значения, для чего требуется серия из двадцати и более измерений. А при

эксплуатации установки совпадений необходимо постоянно контролировать стабильность временных параметров.

Учет этих параметров осуществляется с помощью поправок в расчетных формулах. Наиболее простой формулой с учётом поправок является классическое уравнение Кемпиона:

$$A = \frac{\left(N_{\beta}' - N_{\beta}^{\phi} \right) \left(N_{\gamma}' - N_{\gamma}^{\phi} \right) \left[1 - \tau_R \left(N_{\beta}' + N_{\gamma}' \right) \right]}{\left(\left(N_c' - N_c^{\phi} \right) - 2\tau_R N_{\beta}' N_{\gamma}' \right) \left(1 - N_c' \tau_m \right)}$$

где N_{β}' , N_{γ}' , N_c' - наблюдаемые скорости счета; с индексом «ф» - фоновые скорости счета; τ_m – мёртвое время (одинаковое во всех каналах); τ_R – разрешающее время. Существуют и другие уравнения, в которых поправки с использованием временных параметров носят более сложный характер.

Для введения поправки, связанной с ядерно-физическими свойствами радионуклидов и неидеальной избирательностью детектирующей аппаратуры к виду излучения (бета или гамма), необходимо производить дополнительную серию для получения экстраполированного значения активности из минимум трех измерений для каждого источника.

Современный уровень развития цифровой и компьютерной техники позволяет реализовать цифровой метод совпадений.

Цифровой метод совпадений – это реализация метода совпадений с применением цифровой электронной техники. При этом регистрация поступающих с детекторов излучений импульсов проводится в цифровом виде с записью моментов времени их поступлений и амплитудных

параметров в память персонального компьютера с последующим анализом и выделением совпадений программными средствами.

Все аналоговые модули (кроме усилителей) исключаются из схемы измерений, и появляется возможность определять временные параметры метода совпадений непосредственно обработкой амплитудно-временной информации, поступившей с детекторов. Поскольку массив данных содержит объективную информацию о соотношениях времён между событиями, зафиксированными аппаратурой, появляется возможность определения действительных, физически-обоснованных значений текущего разрешающего и мёртвого времени. Экстраполированное значение активности радионуклидного источника (для учета его ядерно-физических свойств и неидеальной избирательности детектирующей аппаратуры к виду излучения) может быть также получено анализом амплитудно-временной информации.

Таким образом, цифровой метод совпадений в принципе позволяет резко снизить трудоемкость измерений и получать текущие (на момент измерения) значения временных параметров.

Кроме того цифровой метод позволяет проводить повторный анализ файлов, в том числе с использованием других теоретических моделей.

В настоящее время известны три исследовательские группы, разрабатывающие цифровой метод измерения активности радионуклидов. Ряд авторов разрабатывает методики обработки накопленной в измерениях цифровым методом информации, недоступной в аналоговом методе совпадений на примере радионуклидов со сложной схемой распада. При этом основные поправки в большинстве работ вводятся так же, как и в аналоговом методе. Наконец, ни в одной работе не приводится детальный анализ бюджета неопределённости измерений активности радионуклидов. В результате, к настоящему времени цифровой метод

совпадений, несмотря на очевидные перспективные достоинства, так и не получил распространения в метрологической практике.

Цель работы

Создание на основе современных инструментальных и информационных технологий методической базы для эталонных радиометрических установок совпадений нового поколения.

При этом решались вопросы:

- создание программно-аппаратного комплекса для измерения активности радионуклидов цифровым методом совпадений на базе модуля сбора амплитудно-временной информации простейшего типа;
- применение программно-аппаратного комплекса для радиометрических установок, основанных $4\pi(\alpha\beta X)$ - γ совпадений;
- изучение метрологических характеристик цифрового метода совпадений;
- исследование неопределённостей измерений активности радионуклидов.

Научная новизна

- 1) Впервые в России создан программно-аппаратный комплекс для измерения активностей радионуклидов цифровым методом совпадений.
- 2) Впервые в практике измерений активности радионуклидов разработаны методики с программной реализацией:
 - автоматического определения разрешающего времени в цифровом методе совпадений,
 - амплитудно-временной коррекции, уменьшающей неопределённость времени регистрации импульсов,

- определения мёртвого времени в цифровом методе совпадений на основе анализа файла данных, без необходимости проведения многократных измерений, как в аналоговом методе.

На защиту выносятся следующие положения

1. Созданный аппаратно-программный комплекс позволяет производить абсолютные измерения активности радионуклидных источников при существенном снижении трудоёмкости измерений.
2. Разработанная методика цифрового метода совпадений обеспечивает определение значений разрешающего и мёртвого времени непосредственно на момент измерения.
3. Разработанная методика позволяет формировать полный бюджет неопределённости результата измерения активности радионуклидных источников компьютерной обработкой сохранённой измерительной информации.
4. Разработанные методические основы могут быть использованы для сличения различных методик измерений активности радионуклидных источников цифровым методом совпадений через Интернет.

Практическая значимость

На основе разработанных методик создан аппаратно-программный комплекс модернизируемого вторичного эталона активности радионуклидов ВНИИФТРИ для измерения цифровым методом совпадений и соответствующая методика выполнения измерений, которые обеспечивают качественное повышение уровня автоматизации измерений:

- Снижение требований к уровню квалификации обслуживающего персонала.
- Снижение требований к электронике установок метода совпадений.

- Возможность проведения экспрессных измерений активности радионуклидов без снижения точности.
- Обеспечена возможность осуществления контроля качества измерений активности путем обмена файлами данных между лабораториями через Интернет.
- Возможность сохранения первичной информации, поступающей с детекторов и её последующая обработка, что может найти применение при экспрессной проверке математических моделей.

Личный вклад автора

Автором разработана методика и программное обеспечение программно-аппаратного комплекса для измерений активности цифровым методом совпадений, разработано техническое задание на создание аппаратной части комплекса. Автор участвовал в метрологических исследованиях комплекса и проведении сличений.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на конференциях:

- 1 VI научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ. (Дубна 2003)
- 2 VII Международная конференция. Ядерные технологии. (С.Петербург 2004)
- 3 XI ежегодный семинар. Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ. (Обнинск 2004)

Публикации

Содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- 1 В.И.Чернышев, С.В.Коростин, Ю.Н.Мартынюк / Создание цифровой системы абсолютного измерения активности радионуклидов методом совпадений // 7 -я Научная конференция

молодых ученых и специалистов ОИЯИ, Дубна 3-8 февраля 2003 г.,
Тезисы докладов, стр.39

- 2 В.И.Чернышев, С.В.Коростин / Цифровые методы совпадений в метрологии радионуклидов // АНРИ, 2003 №4 (35), стр. 50- 56
- 3 В.И.Чернышев, С.В.Коростин, Ю.Н.Мартынюк, А.С.Трофимов, П.А.Иорданский / Цифровой метод совпадений // Измерительная техника, 2004, №12, стр. 53 -58
- 4 В.И.Чернышев, С.В.Коростин / Разработка программно-аппаратного комплекса для регистрации и анализа амплитудно-временных спектров применительно к задачам измерения активности радионуклидов // Тезисы конференции «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ», Обнинск 24 - 28 ноября 2004 г.
- 5 В.И.Чернышев, С.В.Коростин / Абсолютные измерения активности радионуклидов цифровым методом совпадений / Труды ВНИИФТРИ, Вып. 52(144) «Метрология ионизирующих излучений», М., 2005
- 6 В.И.Чернышев, С.В.Коростин, А.В.Заневский, С.В.Сэпман / Исследование точности абсолютных измерений цифровым методом совпадений // АНРИ , 2006 №2 (45), стр. 66-70

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Диссертация состоит из 113 страниц текста, включая 23 рисунка и 10 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении излагаются основные принципы метода $4\pi(\alpha\beta X)\text{-}\gamma$ совпадений и его роль в метрологии радионуклидов. Отмечается, что

обычно совпадения между импульсами, поступающими с детекторов, определяются с помощью аналоговых модулей, которые включают в себя одноканальные анализаторы, линии задержки, блок совпадений, пересчетные устройства и другие модули. Современный уровень развития цифровой и компьютерной техники позволяет производить измерение амплитуды и времени появления каждого поступающего с детекторов импульса с последующей оцифровкой и занесением результата в память персонального компьютера. Сохраняемая информация анализируется на наличие совпадений программными методами. При этом практически все аналоговые модули (кроме усилителей) исчезают из схемы измерений. Такой способ измерения активности называется цифровым методом совпадений

В первой главе содержится обзор научных работ по теме диссертации. В первом разделе приводятся особенности применения метода совпадений для измерения активности радионуклидов. Основными параметрами для введения поправок на просчеты и на случайные совпадения являются мёртвое время и разрешающее время. Для учета эффектов, обусловленных чувствительностью пропорционального счетчика к γ -излучению и ядерно-физическими свойствами измеряемого радионуклида, применяют экстраполяцию результата измерений к 100% эффективности пропорционального счетчика, для чего необходимо варьировать эффективность пропорционального счетчика. Обычно этого достигают изменением нижнего порога дискриминатора или покрытием источника пленками, причем для этого требуется серия измерений.

Во втором разделе первой главы излагается предложенный в 1975 г метод «компьютерной дискриминации». В постоянной памяти компьютера накапливаются отдельно два амплитудных β -спектра: совпадающий с γ -импульсами в пределах установленного разрешающего времени (β -спектр совпадений) и несовпадающий (β -спектр

несовпадений). Из полученных распределений скоростей счета импульсов по каналам, компьютер рассчитывает число событий в β -канале и канале совпадений для выбранного значения нижней границы амплитудного дискриминатора β -канала. Широкого распространения метод компьютерной экстраполяции в 1970-е – 80-е годы не получил, что объясняется сложностью оборудования. Однако этот метод явился основой современного цифрового метода совпадений.

В третьем разделе описывается метод смешивания импульсов, который также тесно связан с цифровым методом совпадений [1]. Основу метода составляет формирователь общего канала, являющийся смесителем сигналов β - и γ -каналов, реализующий логическое ИЛИ и счетчики живого времени на всех трех каналах. Обозначим число отчетов в β -канале - N_b , число отчетов в γ -канале - N_g , число отчетов в канале совпадений - N_c , а соответствующие живые времена t_b, t_g, t_c . Тогда:

$$\begin{aligned} N_b / t_b &= B + C \\ N_g / t_g &= G + C \\ N_c / t_c &= B + G + C \\ A &= \frac{N_b / t_b * N_g / t_g}{N_b / t_b + N_g / t_g - N_c / t_c} \end{aligned} \tag{3}$$

где B – скорость счета β -импульсов, несовпадающих с γ -импульсами,

G – скорость счета γ -импульсов, несовпадающих с β -импульсами,

1 Jacques Bouchard, Bruno Chauvenet, A simple, powerful $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -coincidence system based on the pulse-mixing method, Nucl. Instr. And Meths. A 422, 395-399, 1999

C – скорость счета совпадений.

В четвертом разделе первой главы приводится обзор всех известных работ в области развития цифрового метода совпадений. Впервые этот метод в современном понимании был описан в работах исследовательской группой из Моквонского университета (Mokwon University – MU) и Корейского НИИ эталонов (KRISS) (Южная Корея). Ими была создана система цифрового сбора данных, поступающих с детекторов, основу которой составили блоки АЦП, генератор с частотой 10 МГц и 80 Мбит статической памяти. Время каждого импульса для обоих входов регистрируется 28-битным счетчиком, считающим импульсы калиброванного генератора. Мёртвое время каждого канала регулируется от 12 до 20 мс с точностью 2 мс.

Более поздняя цифровая реализация метода совпадений была результатом совместной работы ученых из Австралийской организации ядерных исследований и технологий (ANSTO, Австралия) и Национальной Физической Лабораторией Великобритании (NPL, Великобритания)[2]. В созданной ими системе оцифровка и обработка исходных сигналов с детекторов осуществляется в режиме реального времени. Установка включает в себя: два непрерывно работающих АЦП разрешением 20 МГц, которые оцифровывают сигналы от датчиков с частотой таймера; скоростной жесткий диск для записи информации об импульсах во время эксперимента; компьютер и программу для обработки данных и расчета активности в процессе эксперимента. Скорость жесткого диска достаточна для непрерывной записи информации об импульсах идущих с частотой до 30 кГц, при длительности импульсов до 1 мс. Этим определялась максимальная активность измеряемых источников – 30 кБк. Объем непрерывной информации, сохраняемой на жестком диске, может достигать 2 Гб. Таким образом, эта система позволяет контролировать

также форму импульсов и выдает результаты в реальном времени, но повторная обработка файла экспериментальных данных является проблематичной из-за его большого размера (до 2 Гб).

В разработке Чешского метрологического института (СМІ), применяется оцифровка разницы времени между приходами импульсов с разных входов[3]. Сигналы от детекторов предварительно обрабатываются НИМ-модулями (усилители, дискриминаторы, линии задержки, АЦП). Логические сигналы от дискриминаторов идут в блок контроля мёртвого времени. Первый сигнал запускает при этом блок общего мёртвого времени непродолжающегося типа. Блок времени содержит счетчик текущего времени и четыре таймера для измерения интервалов времен между первым и последующими приходящими импульсами. Блок управления направляет данные от АЦП и таймеров в кэш память (32 кб). Программа управляет каналами DMA и параллельным портом для контроля и записи информации в файлы. При этом используются 16-мегабайтные файлы с заголовками, которые содержат один миллион 16-байтных записей. Каждая запись содержит информацию о четырех импульсах.

Одновременно с развитием технической стороны цифрового метода совпадений развивается также и методология его применения к задачам измерения активности, обзор которых приводится в пятом разделе первой главы. В работе [4] рассмотрена возможность введения поправки на случайные совпадения с использованием созданной цифровой измерительной системы. Для определения количества случайных совпадений в пределах одного измерения, при обработке данных применялось смещенное окно временного дискриминатора, в которое заведомо не попадают истинные совпадения. Анализ статистики отсчетов

3 M.Havelka, P.Auerbah, J.Sochorova, Appl. Radiat. Isot. 56, 265, 2002

4 H.Y. Hwang, T.S. Park, K.H. Kim et al, Nucl. Instr. And Meths. A 413, 228, 1998

случайных совпадений выявил, что они распределяются по нормальному закону.

В работе [5] была предложена теория определения вклада в мёртвое время времени отклика аппаратуры на γ -частицы, не попадающие в окно дискриминатора, настроенного на интересующую спектральную линию. Было показано, что если учитывать все регистрируемые события, то в первом порядке приближения (по разрешающему времени) это позволяет использовать более простой подход Кемпиона. Соответствующая модель была построена и проверена методом Монте-Карло.

В работе [6] рассмотрена возможность программной обработки информации получаемой от цифровой системы совпадений по методу смешивания импульсов. Авторы программно эмулируют общий канал для расчёта активности источника, измеряемого своей цифровой аппаратурой совпадений.

Из анализа можно сделать следующие выводы. К настоящему времени разработаны различные аппаратные реализации цифрового метода совпадений и проработаны некоторые методические вопросы. Однако следует отметить, что разработками цифрового метода совпадений применительно к задачам радионуклидной метрологии занимается ограниченное число лабораторий. Ряд авторов разрабатывают методики обработки накопленной в измерениях цифровым методом информации, недоступной в аналоговом методе совпадений на примере радионуклидов со сложной схемой распада. При этом основные поправки в большинстве работ вводятся так же, как и в аналоговом методе. Практически отсутствуют рекомендации по процедуре экстраполяции цифровым

5 J.D. Keightley, G.C.Watt, Appl. Radiat. Isot.. 56, 205-210, 2002

6 Miroslav Havelka, Pavel Auerbah, Jana Sochorova, Appl. Radiat. Isot.

60,409-413, 2004

методом совпадений (в лучшем случае подразумевается применение компьютерной экстраполяции Смита). Наконец ни в одной работе не приводится детальный анализ бюджета неопределённости. В результате к настоящему времени цифровой метод совпадений так и не получил распространения в метрологической практике.

Во второй главе описывается разработанный программно-аппаратный комплекс для реализации цифрового метода совпадений и производится анализ его метрологических параметров. В первом разделе описывается структура комплекса, который состоит из двухвходового измерительного модуля для сбора амплитудно-временной информации, поступающей с детекторов измерительного модуля и программного обеспечения. Модуль представляет собой плату, вставляемую в разъем ISA обычного IBM/PC совместимого компьютера. На плате смонтированы два независимых 10-битных пиковых АЦП (по 1024 канала), буфер на два измерения (по одному на вход) и таймер с точностью дискретизации 20 нс (калиброванный генератор на 50 МГц). При поступлении импульса на любой из входов, модуль фиксирует его амплитуду и время в буфере, а затем вырабатывает сигнал прерывания компьютеру (IRQ). Время сигнала фиксируется по превышению минимального порогового уровня 50 мВ, амплитуда по максимальному уровню в импульсе. Схемы АЦП независимы по обоим входам платы, а наличие одного таймера позволяет проводить измерения времени по обоим входам в единой шкале.

Для управления системой и сбора данных в удобном для обработки виде была написана программа DigiRec на языке Borland Pascal 7.0. Основу программы составляют обработчики аппаратных прерываний, вырабатываемых системой по приходу импульсов. Как только возникает прерывание от одного из входов, соответствующий обработчик считывает данные показаний времени и амплитуды пришедшего импульса с буферных регистров устройства, и, без всякой дополнительной обработки, записывает их в предварительно распределенную оперативную память.

По команде с клавиатуры компьютера или при превышении имеющейся распределенной памяти, программа DigiRec останавливает процесс измерений. По результатам измерений формируется текстовый файл с результатами эксперимента. В заголовке файла (шесть строк) фиксируется информация о версии и режиме работы программы, исходный путь файла, дата и время проведения эксперимента, причина его завершения, интервал времени между первым и последним импульсами, число импульсов и длительность измерений, а также комментарий, вводимый в параметрах командной строки. После заголовка, следуют строки, содержащие параметры импульсов от детекторов: время регистрации импульса, номер входа по которому пришел этот импульс и его амплитуда (в условных единицах). Кроме того, ведется единый лог-файл, в котором построчно содержится информация о проведенных экспериментах.

Используется два варианта компиляции и работы программы DigiRec:

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.

2) Компиляция в программу реального режима (real-mode). В режиме реального времени программа не может напрямую обращаться к оперативной памяти выше адреса 1024 Кб, 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 мёртвое время.

Во втором разделе описывается структура и принципы работы интерактивной программы DigiSolve, написанной в среде MathCAD 11, предназначенной для обработки записанной на жесткий диск компьютера

амплитудно-временной информации. Предварительная обработка данных осуществляется двумя программными фильтрами: настраиваемый амплитудный дискриминатор (выделяет из потока только те импульсы, которые удовлетворяют условию установленного для каждого входа возможного диапазона уровней сигнала) и фильтр мёртвого времени (удаляет импульсы, интервал следования между которыми, меньше заданного в программе).

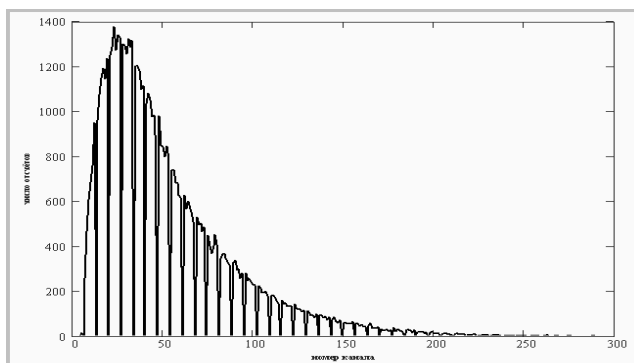


Рис.1. Вид β -спектра при разбиении на 300 каналов.

Получаемая в измерениях информация имеет двоичную природу. Поэтому при построении спектров с произвольным числом каналов, как амплитудных, так и временных, возникают сильные «биения», которые обусловлены тем, что различным каналам отображаемого спектра может соответствовать различное количество чисел представления информации (см. Рис.1). При вычислениях по спектрам это становится существенной проблемой.

Для решения проблемы дискретности исходного сигнала была разработана процедура статистического размытия, в которой к величине каждого измеряемого параметра добавляется случайная равномерно-распределенная величина в диапазоне от 0 до ΔI , где ΔI – минимально возможный шаг измерения. Такое размытие практически не влияет на точность результата измерений, поскольку вносимая неопределённость не

превышает цены деления шкалы. В нашем случае к измеренной величине времени добавлялась случайная задержка от 0 до 20 нс, а к амплитуде сигнала – случайное значение от 0 до 1.

Канал совпадений формируется программой Digisolve посредством специального фильтра и процедуры амплитудно-временной коррекции. Фильтр выделяет из массива данных, импульсы разных каналов, совпадающие по времени с точностью до разрешающего времени. Для определения разрешающего времени формируется временной спектр совпадений (распределение импульсов в зависимости от временного интервала между ними). Для этого вычисляется интервал времени между импульсами в разных каналах в пределах исследуемого диапазона и строится гистограмма их распределения (временной спектр совпадений), (См. Рис.2). Затем производится поиск краёв полученного распределения.

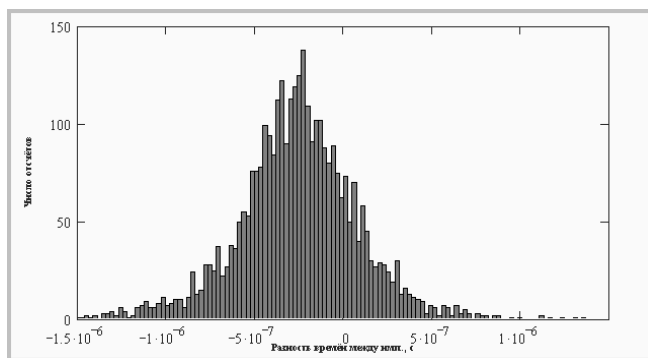


Рис.2. Спектр разностей времён совпадающих импульсов (спектр совпадений)

Получаемая в измерениях амплитудно-цифровая информация позволяет вводить поправку на зависимость времени регистрации импульсов от амплитуды, которая возникает из-за конечной крутизны переднего фронта импульса. Программа Digisolve для этого при фиксированных уровнях амплитудного программного дискриминатора в одном из каналов вычисляет зависимости задержки в канале совпадений

от амплитуды в другом канале. Эти зависимости определяются формами передних фронтов импульсов и являются их обратными функциями. Поэтому задача сводится к определению коэффициентов в известных формулах, описывающие сигналы с детекторов. Подбор коэффициентов осуществлялся методом Левенберга-Марквардта в пакете MathCAD. В качестве параметра минимизации было выбрано стандартное отклонение интервалов времени между импульсами, попадающим в канал совпадений. Полученные значения автоматически вносились в виде поправок к каждому измеренному комплексом времени фиксации импульса. В результате стандартное отклонение интервалов между импульсами при совпадениях снизился почти в три раза (с 3,4 мкс до 1,2 мкс) и по порядку величины стало равно временному разрешению пропорционального счетчика, обусловленному временем дрейфа электронов в газе.

В третьем разделе анализируются мёртвое и разрешающее время программно-аппаратного комплекса - основные фундаментальные параметры, которыми характеризуется любая установка для измерений методом совпадений:

Мёртвое время τ_D – это временной интервал, следующий за зарегистрированным событием, во время которого установка становится нечувствительной для другого отсчета.

Разрешающее время схемы совпадений τ_R – временной интервал, во время которого события, зарегистрированные в каналах, считаются совпадающими. Величина разрешающего времени определяет количество случайных, то есть не связанных с актами распада, совпадений, зарегистрированных установкой.

Во время измерений измерительный модуль и компьютер работают в едином комплексе. Поэтому мёртвое время всего комплекса складывается из двух составляющих. Первая – аппаратное мёртвое время τ_D^h , определяемое временем работы пиковых АЦП, задержками при

формировании управляющих сигналов прерываний и т.п. Вторая составляющая – программное мёртвое время τ_D^s , обусловленное работой на компьютере программы DigiRec в процессе сбора данных. Измерения мёртвого времени проводились с помощью генератора двойных импульсов и специальных программ, функционально идентичных измеряющей программе DigiRec, но с удвоенной (DigiRec2) и утроенной (DigiRec3) процедурой обработки прерывания.

Особенностью работы модуля сбора информации стало то, что при считывании информации от одного измерительного канала, буфер второго входа открыт для записи информации

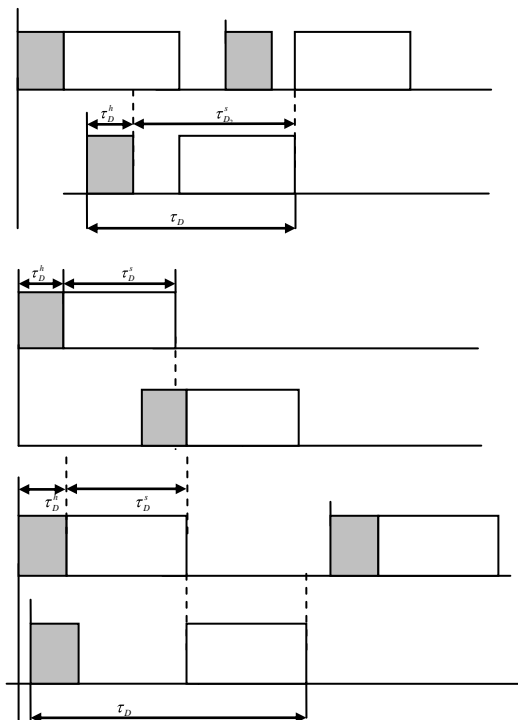


Рис.3 (а-в). Структура мёртвого времени комплекса

поступившего импульса, однако передача соответствующих кодов в компьютер возможна только по окончании процесса считывания информации от первого канала. Таким образом, возможна реализация трех типов взаимного расположения импульсов в соседних каналах, формирующих мертвые времена (см. Рис.3).

Значение общего мёртвого времени определялось из спектра разностей времен между импульсами в одном канале (См. Рис.4).

В идеальном случае, для аппаратуры с мёртвым временем непродолжающегося типа, спектр имел бы резкий край в зоне значения мёртвого времени, и в качестве мёртвого времени следовало бы выбрать левую границу этого спектра, однако времена работы АЦП и программы сбора информации DigiRec могут слегка варьироваться от импульса к импульсу. В нашем случае это связано с особенностями работы кэш-памяти компьютера, амплитудной зависимостью мёртвого времени АЦП типа Вилкинсон, и зависимостью мёртвого времени от событий в другом канале.

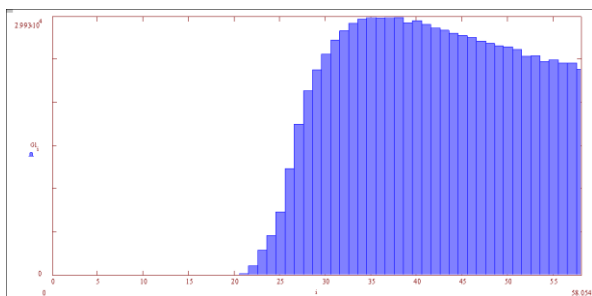


Рис.4. Спектр разностей времён в β -канале для оценки мёртвого времени

Поэтому, при рассмотрении спектра разностей времен между импульсами в одном канале в данных реального эксперимента, край спектра размывается, приобретая некоторый наклон. Для оценки мёртвого времени вычисляется площадь спектра разностей времён в области наклона (до максимума). Затем по этому наклону выбирается значение мёртвого времени, при котором площадь наклона в кривой разностей времен была бы равна площади прямоугольника, характерного для идеального случая.

Поскольку мёртвое время имеет сложную структуру, был проведен анализ применимости основных уравнений вычисления активности (Кемпиона и Смита).

Уравнение Кемпiona выводится феноменологически и определяется следующим образом:

$$A = \frac{(N_{\beta}' - N_{\beta}^{\phi})(N_{\gamma}' - N_{\gamma}^{\phi})[1 - \tau_R(N_{\beta}' + N_{\gamma}')]]}{((N_c' - N_c^{\phi}) - 2\tau_R N_{\beta}' N_{\gamma}') (1 - N_c' \tau_m)} \quad (4)$$

где N_{β}' , N_{γ}' , N_c' - наблюдаемые скорости счета; с индексом «ф» фоновые скорости счета; τ_m - мёртвое время (одинаковое во всех каналах); τ_R - разрешающее время; А - активность радионуклидного источника.

А уравнение Смита выведено точным интегрированием микроскопической модели потоков событий и определяется следующими

соотношениями:

$$A = \frac{N_{\beta}' N_{\gamma}'}{N_c'}$$

$$N_c'' = \frac{N_c'' (N_{\beta}' e^{N_{\beta}' \tau_m} - N_{\gamma}' e^{N_{\gamma}' \tau_m})}{\left(N_{\beta}' e^{N_{\beta}' \tau_m} e^{N_{\gamma}' - N_{\beta}' \tau_R} - N_{\gamma}' e^{N_{\gamma}' \tau_m} e^{N_{\beta}' - N_{\gamma}' \tau_R} \right) \frac{N_c'}{(1 - \tau_m N_{\beta}') (1 - \tau_m N_{\gamma}')} \left(e^{N_{\beta}' \tau_m} - e^{N_{\gamma}' \tau_m} \right)}$$

$$N_{\beta}' = \frac{N_{\beta}'}{1 - \tau_m N_{\beta}'} - N_{\beta}^{\phi} \quad N_{\gamma}' = \frac{N_{\gamma}'}{1 - \tau_m N_{\gamma}'} - N_{\gamma}^{\phi} \quad N_c'' = N_c' - 2N_{\beta}' N_{\gamma}' \tau_R$$

(5)

Кроме того, был построен алгоритмический расчет активности с использованием уравнения Бриана:

$$A = \frac{N_{\beta}' N_{\gamma}'}{N_c' - 2\tau_R N_{\beta}' N_{\gamma}'} \frac{1}{1 - \tau_R (N_{\beta}' + N_{\gamma}')} \quad (6)$$

и расчетом живого времени с использованием формализма метода смешивания импульсов. Для проверки влияния сложной структуры мёртвого времени на вычисление активности радионуклидов различными способами была создана программа DCC-МС, моделирующая методом

Монте-Карло временные соотношения между отсчетами во входах при измерении радиоактивных источников.

Разрешающее время определялось из анализа спектра совпадений. Использованный метод «скользящего окна» позволял оптимизировать положения дискриминаторов «временного окна» путем определения точек перегиба спектра совпадений. Проведенные контрольные измерения с источником Am-241 подтвердили правильность такой процедуры.

В третьей главе проводится описание процедуры обработки данных и анализ источников неопределённости при измерении активности аппаратно-программным комплексом, описанным в Гл. II.

В первом разделе рассматривается расчет статистической неопределённости измерений, В котором используется известное уравнение:

$$u_s \left(A \right) = \sqrt{2 \frac{N_c}{N_\beta N_\gamma} - \frac{1}{N_\gamma} - \frac{1}{N_\beta} + \frac{1}{N_c}} \quad (7)$$

Во втором разделе рассматривается процедура экстраполяции, т.е. нахождение зависимости $\frac{N_\beta N_\gamma}{N_c} \left(\frac{1 - \varepsilon_\beta}{\varepsilon_\beta} \right)$. При процедуре экстраполяции необходимо учитывать сильную корреляцию экспериментальных данных. Проблема корреляции была решена разбиением файла данных на непересекающиеся во времени массивы. По каждому из массивов вычисляется активность с задаваемой эффективностью в соответствии с методикой, изложенной в Главе II. Изменение эффективности β -канала осуществляется последовательным удалением импульсов с малыми амплитудами из файла данных. Для исключения влияния возможных дрейфов измерительной аппаратуры за время измерения, массивы меняются местами случайным образом. По полученным значениям активности при разных эффективностях β -канала методом наименьших квадратов проводится экстраполяционная кривая.

Экспериментальная проверка проводилась на основе файлов амплитудно-временной информации, полученной при измерениях активности источника V70 Am-241 (ВНИИМ). Файл данных V70 был разделен на 5 непересекающихся во времени массивов. В каждом массиве были рассчитаны активности по формуле Кемпиона для значений $\frac{1 - \varepsilon_\beta}{\varepsilon_\beta}$ 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1, которые получали процедурой, последовательно повышающей нижний уровень программного дискриминатора в β - канале. По полученным значениям активности строилась линейная экстраполяция к точке стопроцентной эффективности β -канала. При этом для получения наиболее достоверной величины активности, использовалось усреднение экстраполированных значений, полученных из некоррелированных между собой наборов данных.

В третьем разделе приводится бюджет неопределённости определения активности источника, который состоит из следующих компонент:

- 1) Статистическая неопределённость, которая вычисляется по формуле (7).
 - 2) Неопределённость, обусловленная введением поправки на просчеты, обусловленные мёртвым временем, имеет две составляющие:
 - Неопределённость $u_1 \left(\leftarrow_D \right)$ определения мёртвого времени из спектров разностей, которая равна погрешности интегрирования;
 - Неопределённость $u_2 \left(\leftarrow_D \right)$, обусловленная недостаточной адекватностью расчетной модели реальной структуре мёртвого времени. Неопределённость $u_2 \left(\leftarrow_D \right)$ для каждого источника рассчитывается методом Монте-Карло программой DCC-MC.
- Суммарная стандартная неопределённость мёртвого времени определяется по формуле:

$$u_{\text{б}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (8)$$

Поскольку при оценке неопределённости не использовались статистические методы обработки рядов данных, то эта составляющая неопределённости относится к типу В.

3) Неопределённость, обусловленная введением поправки на случайные совпадения. Определяется точностью определения разрешающего времени и рассчитывается по формуле:

$$u_{\tau_R} = \frac{\partial A}{\partial \tau_R} \Delta_R \quad (9)$$

4) Неопределённость, обусловленная фоном. Для вычисления фоновых скоростей счета накапливается «фоновый» файл амплитудно-цифровой информации в отсутствии источника. Вклады в суммарную неопределённость измерения активности определяются следующими соотношениями:

$$u_{bg\gamma} = \frac{\partial A}{\partial N_{bg\gamma}} \alpha_N \sqrt{N_{bg\gamma}} \quad (10)$$

$$u_{bg\beta} = \frac{\partial A}{\partial N_{bg\beta}} \alpha_N \sqrt{N_{bg\beta}},$$

где $N_{bg\beta}$ и $N_{bg\gamma}$ – количество фоновых импульсов в соответствующих каналах; значения частных производных определяются стандартными средствами MathCAD программой DigiSolve; α_N – квантиль нормального распределения. При расчете этой составляющей неопределённости используется априорное предположение о пуассоновской статистике фона. Поэтому неопределённость относится к типу В.

5) Неопределённость экстраполяции. Стандартная неопределённость $u(a_0)$ при этом определяется как погрешность вычисления свободного члена a_0 методом наименьших квадратов и относится к типу В.

..... В четвертом разделе приводятся результаты сличений аппаратурой установки $4\pi\beta\text{-}\gamma$ совпадений из состава Государственного эталона активности радионуклидов (ВНИИМ им. Д.И.Менделеева). Измерения проводились с пропорциональным счетчиком, заполняемым аргон-метановой смесью при атмосферном давлении. Применялись одни и те же детекторы и усилители, одновременно, в цифровом и аналоговом методе для радионуклидов Co-60 и Am-241 . Активность источников Am-241 прошла контроль Международной опорной системы SIR в рамках ключевого сличения COOMET.RI(II)-K2.Am-241. Результаты измерений представлены в таблице 1. Вычисления в цифровом методе совпадений проводились по формуле Кемпиона. Кроме того, проводились вычисления активности в цифровом методе по формулам Смита и модифицированной формуле Бриана.

Из проведенных сличений измерений активности следует, что, несмотря на сложную структуру мёртвого времени, обусловленную простейшим устройством модуля сбора амплитудно-временной информации, точность измерений активности обеспечивается на уровне не менее 0,6%. При этом наиболее предпочтительным является уравнение Кемпиона, что и ожидалось из анализа уравнений, проведенного в Главе II, и возможно пренебрегать неопределённостью, определяемой сложной структурой мёртвого времени.

В пятом разделе проводится анализ возможности проведения сличений через Интернет. Как следует из результатов измерений активности цифровым методом совпадений, амплитудно-цифровая информация, полученная при помощи соответствующих измерительных модулей на детекторах установки $4\pi\beta\text{-}\gamma$ совпадений позволяет различным операторам получать значения активности источника с бюджетом

неопределённости. Уровень современного развития Интернет позволяет организовывать пересылку файлов данных. Основными возникающими при этом трудностями являются большой объем файлов данных амплитудно-временной информации и низкая скорость передачи по сети Интернет. Наш измерительный модуль формирует файл данных, занимающий порядка 20 Байт на один импульс (так как файл имеет текстовое представление для упрощения считывания и взаимных конвертирований).

Результаты сличений	V70	V24	V64	V66
Активность по цифровому методу совпадений (Кемпион)	5657,44	16402,2	12673,5	3077,68
Неопределённость по цифровому методу совпадений, Бк	7,45	47,3	35,8	6,7
Неопределённость по цифровому методу совпадений, %	0,13%	0,29%	0,28%	0,22%
Активность ВНИИМ	5659,8	16408,9	12708,3	3077
Неопределённость ВНИИМ, Бк	1,254	2,951	24,6	6
Неопределённость ВНИИМ, %	0,02%	0,02%	0,19%	0,19%
Отклонение, Бк	-2,36	-6,6878	-34,8	0,68
Отклонение, %	-0,04%	-0,04%	-0,27%	0,02%
Бюджеты неопределённостей				
Вклад статистической составляющей	5,573	29,1	26,757	5,809
Неопределённость из-за мёртвого времени без учёта сложной структуры	0,669	4,42	1,254	0,098
Неопределённость, связанная со сложной структурой мёртвого времени	2,79	8,091	6,264	1,61
Неопределённость из-за разрешающего времени	3,5	33,891	20,701	1,293
Неопределённость фоновой скорости счёта в Бета-канале	-0,005	-0,006	-0,006	-0,005
Неопределённость фоновой скорости счёта в Гамма-канале	-0,552	-0,556	-1,207	-1,215
Неопределённость экстраполяции	0,641	2,478	1,767	0,188
Суммарная неопределённость:	7,229	45,682	34,495	6,287
Сравнение методов расчёта				
Уравнение Смита	5654,32	16344,4	12639,4	3076,4
Отклонение	-0,10%	-0,39%	-0,54%	-0,02%
Уравнение Бриана	5654,34	16411,7	12630,3	3075,14
Отклонение	-0,10%	0,02%	-0,61%	-0,06%

Таблица 1. Результаты сличений с ВНИИМ.

Соответственно файл данных, содержащий 4 млн. импульсов (для обеспечения малой статистической неопределённости) занимает объем порядка 80 Мбайт, но с учётом сжатия около 20 Мб. В настоящее время файлы подобного объема не редкость в Интернете, и для работы с ними удобно использовать апробированное решение на базе FTP-сервера. Установка и поддержка FTP-сервера с требуемыми характеристиками не представляет технической проблемы и не требует существенных капиталовложений.

Как было изложено выше, в настоящее время в мире известно три исследовательские группы, разрабатывающие цифровой метод измерения активности. В 2003 г. все эти группы (включая нашу) образовали Рабочую группу Международного комитета по метрологии радионуклидов (ICRM), которая призвана исследовать возможность таких сличений. В рамках деятельности Рабочей группы был создан ftp-сервер (<http://users.skynet.be/icrmrmt/Projects/DCC>) и организован пробный обмен файлами объемом 20 Мб. Разработаны конверторы данных и проведена подготовка к организации сличений, намечены пути дальнейшего развития.

В заключении изложены основные результаты выполненной работы:

1. Создан программно-аппаратный комплекс для сбора амплитудно-цифровой информации, поступающей с детекторов ионизирующих излучений. Комплекс позволяет заносить в постоянную память компьютера амплитуду и время регистрации каждого импульса с детекторов.
2. Разработана процедура формирования канала совпадений из анализа накопленной в постоянной памяти компьютера амплитудно-цифровой информации.
3. Разработана процедура определения мёртвого и разрешающего времени метода совпадений на основе анализа накопленной в постоянной памяти компьютера амплитудно-цифровой информации.
4. Разработана процедура амплитудно-временной коррекции, учитывающая смещение времени регистрации импульса модулем сбора амплитудно-временной информации в зависимости от амплитуды.
5. Проведен анализ структуры мёртвого времени программно-аппаратного комплекса. Показано, что простая архитектура модуля сбора амплитудно-временной информации обуславливает сложную

структуру мёртвого времени квази-продляющегося типа. Проведен анализ возможности применимости основных формул вычисления активности радионуклидов методом совпадений.

6. Разработана программа вычисления активности радионуклидов методом $4\pi\beta\text{-}\gamma$ совпадений на основании файла амплитудно-цифровой информации. В рамках программы выполняется процедура экстраполяции измеренного значения активности к 100% эффективности β -детектора с учетом корреляции данных.
7. Проведены сличительные измерения активности аналоговым и цифровым методами совпадений на Государственном эталоне активности радионуклидов. Получено согласие результатов в пределах стандартной неопределённости.
8. Из проведенных исследований следует, что при конструировании измерительных модулей для цифрового метода совпадений допустимо брать за основу, приведенную в Главе II, простейшую структуру такого устройства. Несмотря на то, что простейшая конструкция обуславливает достаточно большое метровое время сложной структуры, на точность измерений это влияет незначительно.
9. Предпочтительным уравнением для цифрового метода совпадений в условиях простейшего измерительного модуля со сложной структурой мёртвого времени, является уравнение Кемпиона.
10. Разработана методика измерения активности радионуклидов с использованием аппаратно-программного комплекса для реализации цифровых совпадений.