

Мелешко Евгений Алексеевич

**Методы и средства временной и пространственной
селекции в информационно-измерительных
системах для ядерно-физических исследований**

Специальность: 05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие
системы (промышленность, наука и научное обслуживание)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Работа выполнена в НАЦИОНАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ЦЕНТРЕ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Модяев А.Д.

доктор технических наук Сахаров К.И.

доктор технических наук Волков В.Г.

Ведущая организация – Специализированный научно-исследовательский
институт СНИИП

Защита состоится г. В час. мин на заседании
диссертационного совета Д 212.130.02 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409,
Москва, Каширское ш., 31. т. 324-84-98, 323-91-76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Скоробогатов П.К.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Ядерно-физические методы исследования вещества и внешней среды в последние годы получили мощный импульс развития, связанный с необходимостью предотвращения террористических актов и радиоактивного загрязнения окружающей среды. Создание эффективной методики обнаружения и идентификации взрывчатых и наркотических веществ, скрытых в контейнерах, ручной клади или грунте, является актуальной задачей.

Не менее актуален контроль окружающей среды на наличие радиоактивных загрязнений, вызванных эксплуатацией радиоактивных систем, техногенными катастрофами или результатами террористической деятельности.

Первичная информация в ядерно-физических средствах исследований поступает в виде случайной последовательности импульсов от детекторов излучений. Кроме полезных событий первичная информация содержит целый ряд мешающих сигналов, вызванных фоновым излучением, электромагнитными помехами и др.

Одним из наиболее эффективных способов исключаящих или существенно снижающих влияние мешающих сигналов является временная селекция, позволяющая выделить определенный физический процесс и существенно повысить соотношение эффект/ фон. Наглядным примером этого способа является повышение в 200 – 300 раз методами временной и пространственной селекции сигналов отношения полезных сигналов к фоновому излучению при использовании нейтронных методов поиска опасных объектов.

Временная и пространственная селекция используется для выделения частиц и излучений, имеющих заданное направление, путем применения комбинаций детекторов и сцинтилляторов, что находит широкое применение, как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях, в частности при позиционировании опасных объектов. Временная селекция лежит в основе временного анализа, когда используется большое число временных каналов, границы которых смыкаются друг с другом. В свою очередь временные анализаторы позволяют повысить качество временной селекции и проводить ее по наиболее сложным алгоритмам. В общем плане методика временной селекции была разработана достаточно широко. Однако развитие ядерно-физических методов исследования свойств вещества, поиска опасных объектов, измерения гамма-поля внешней среды, а также необходимость оснащения крупных международных экспериментов, потребовало разработки и создания новых методов и средств временной

селекции, обладающих более высоким временным разрешением, быстродействием и возможностью определения координат ядерных событий.

Целью настоящей работы является создание и применение на основе научно обоснованной методологии временной и пространственной селекции целого класса новых измерительных комплексов для исследования свойств вещества различными ядерно-физическими методами, изучения гамма-поля внешней среды и определения координат ядерных событий.

Основные задачи диссертации:

1. Анализ требований к измерительным комплексам для исследования свойств вещества и параметров окружающей среды в плане повышения информативности результатов исследования на основе применения временных измерений и селекции импульсных потоков случайных сигналов.
2. Разработка методологии и создание средств временных измерений и временной селекции с повышенным временным разрешением и высокой загрузочной способностью.
3. Создание автоматизированной измерительной системы для изучения свойств вещества μ SR-методом, с повышенными метрологическими и экспериментальными характеристиками.
4. Разработка новых методов селекции импульсов по длительности и создание на их основе исследовательских комплексов для измерения гамма-поля внешней среды.
5. Анализ требований и разработка методов определения координат ядерных событий вне детекторов излучений.
6. Разработка триггерной электроники для детектора T0 эксперимента ALICE (A Large Ion Collider Experiment) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) с использованием методики линейного позиционирования и локализации зоны точек столкновения ускоренных в Большом Адронном Коллайдере (LHC) ядер.
7. Разработка вариантов электронного обеспечения позитронно-эмиссионных томографов, позволяющих сократить число фотоприемников.
8. Разработка электронного обеспечения устройств обнаружения и объемного определения координат опасных веществ в маскирующих средах на основе применения метода меченых нейтронов.

Таким образом, **объектом исследования** является область экспериментальной физики, связанная с обработкой первичной информации поступающей от детекторов излучений, а конкретным предметом исследования – быстродействующая импульсная электроника, обеспечивающая временные измерения и временную селекцию

флуктуирующих случайных сигналов в наносекундном и субнаносекундном диапазонах, а также определение координат ядерных событий вне детекторов излучений на основе этих измерений. Методологической и теоретической основой работы являются труды отечественных и зарубежных физиков–экспериментаторов, а также специалистов по ядерной электронике, заложивших основы электронных методов ядерной физики. Особенно хотелось бы отметить труды член–корр. АН И.И.Гуревича и член–корр. АН Б.А. Никольского, с которыми диссертанту посчастливилось работать по мюонной тематике, а также проф. Ю.В. Сивинцева и доктора физ-мат. наук А.Г.Зеленкова под руководством которых проведены исследования в морских экспедициях.

В своей работе диссертант использовал капитальные труды специалистов по ядерной электронике: проф. А.П.Цитовича, проф.В.А. Григорьева, проф. В.В.Матвеева, проф. Б.И.Хазанова, проф. Л.А. Маталина и др.

Научная новизна работы

1. Разработана концепция повышения информативности измерительных систем для исследования свойств веществ и параметров гамма – поля окружающей среды на основе методов и средств быстрой временной селекции флуктуирующих сигналов.
2. Предложена методология построения электронной аппаратуры для работы с детекторами, в которых используются протяженные пластмассовые сцинтилляторы. Теоретически и экспериментально показана возможность снижения эффективного уровня шумов при использовании таких детекторов в амплитудной спектрометрии, предложена и реализована оригинальная методика, позволяющая существенно снизить влияние размеров сцинтилляторов на физическое разрешение временных спектрометров с протяженными пластмассовыми сцинтилляторами
3. Предложен метод многоканальной передачи спектрометрической информации по одной линии связи на основе кодирования параметрами формы импульсов каждого канала и декодирования сигналов методом временной селекции по форме. Показано, что в широком динамическом диапазоне амплитуд искажения восстанавливаемых спектров от датчиков из-за наложений сигналов на линии связи в такой системе в несколько раз меньше, чем при цифровом методе кодирования номера детектора. Предложена и реализована оригинальная схема селекции по длительности импульсов с пологими фронтами, амплитуда которых изменяется в широком динамическом диапазоне. Разработана и реализована оригинальная система передачи по одному кабелю данных от нескольких детекторов гамма–поля водной среды.

4. Разработана нетрадиционная аналого–цифровая система идентификации типа сцинтиллятора в составном детекторе для оперативной дистанционной регистрации гамма–поля на земной поверхности с помощью мобильной аппаратуры.
5. Разработана методика определения координат ядерных событий вне детекторов излучений на основе временных измерений и селекции для трех случаев определения координат событий:
линейного (однокоординатного);
двухкоординатного (на плоскости);
объемного (трехкоординатного).
6. Для детектора T0 эксперимента ALICE в ЦЕРНе разработаны алгоритм, структура и схема электронного устройства для определения линейной координаты столкновения ускоренных ядер и выработки триггерного сигнала вершины события T0v, если это столкновение произошло в заданной зоне, границы которой устанавливаются цифровым способом по магистрали VME. Прототип устройства успешно испытан на пучке ускорителя в ЦЕРНе, рабочий образец установлен на ускорителе LHC (эксперимент ALICE).
7. Для позиционно–эмиссионной томографии разработаны два варианта структуры быстрой электроники, позволяющие использовать в кольце ПЭТ пониженное по сравнению с числом сцинтилляторов количество фотоприемников.
8. Предложен и запатентован новый метод регистрации сопутствующих альфа-частиц при работе с мечеными нейтронами.
9. Предложен и запатентован новый метод поиска опасных веществ на основе использования неколлимированных импульсных пучков быстрых нейтронов.

Практическая и научная значимость работы

Все аппаратные комплексы созданные на основе быстрой временной и пространственной селекции были использованы в ядерно-физических исследованиях как фундаментального, так и прикладного характера.

Так на основе разработанных методов временных измерений и селекции была создана и развивалась система функциональных блоков наносекундной электроники. Блоки этой системы выпускались серийно опытным производством РНЦ КИ и использовались в различных вариантах в РНЦ КИ, а также в ИЯФ СО АН СССР, ОИЯИ, ИТЭФ, ИЯИ РАН, НИЯФ МГУ, на Ровенской АЭС, в Чернобыле для проведения фундаментальных и прикладных исследований. К ним, в частности, относятся: работы по исследованию временных параметров сгустков электронов на орбите накопления

ускорителя ВЭПП–3 и характеристик детекторов рентгеновского излучения в Институте ядерной физики СО АН СССР; определение характеристик многоэлементного модуля для ПЭТ на основе годоскопического ФЭУ; изучение ядерных процессов, приводящих к множественному испусканию частиц и квантов; тестирование нейтронных генераторов и аппаратуры на их основе при использовании метода меченых нейтронов; реакторные измерения на стенде ОР–М (Bench Mark эксперимент); измерения малой активности в Чернобыле для определения загрязненности почв и кернов из аварийного четвертого блока Чернобыльской АЭС.

Наиболее полно система наносекундных блоков использовалась в автоматизированном мюонном комплексе, с помощью которого на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ был проведен целый ряд исследований свойств вещества μ SR-методом и получены интересные физические результаты, опубликованные в ведущих отечественных и зарубежных физических журналах.

На основе разработки новых методов селекции по длительности создан исследовательский комплекс для изучения гамма–поля водной среды с несколькими выносными датчиками, информация от которых оперативно передается на борт буксирующего судна по одному кабель–тросу. Комплекс успешно эксплуатировался в двух экспедициях в Японском море.

На основе разработки методологии позиционирования ядерных событий вне детекторов излучений разработан модуль TVDC, позволяющий установить факт взаимодействия ядер в заданной зоне детектора T0 эксперимента ALICE в ЦЕРНе. Разработано и испытано на пучках ускорителя несколько прототипов и рабочий образец TVDC, который установлен и эксплуатируется в системе триггерной электроники детектора T0 на пучке ускорителя LHC в ЦЕРНе.

Создано несколько вариантов аппаратуры для экспериментов по обнаружению опасных веществ с помощью меченых нейтронов. Эта аппаратура используется в ВНИИА им. Духова, НИИХМ, а также исследовательских центрах Кореи и Индии.

На основе разработки цифрового метода селекции по длительности создана аппаратура для спектрометра с составным сцинтиллятором, предназначенного для мобильных комплексов мониторинга гамма–поля на поверхности земли.

Основные положения методологии временных измерений и селекции изложены диссертантом в четырех книгах, которыми пользовались разработчики и пользователи наносекундной аппаратуры, а также студенты факультета НБИК МФТИ, где диссертант читает лекции по курсу «Экспериментальные методы ядерной физики».

На защиту выносятся следующие положения и результаты

1. Методология временной селекции случайных сигналов в схемах с программно–изменяемыми алгоритмом работы и временным разрешением, применение устройств точной временной привязки к фронту, а также к фронту и срезу входного импульса для повышения разрешающей способности селекции; применение фазирования периодических и случайных сигналов при селекции опорной серии в счетно–импульсных временных преобразователях с целью снижения дифференциальной нелинейности преобразования.
2. Технические средства для временных измерений и селекции случайных сигналов в наносекундном диапазоне, в том числе: устройств точной временной привязки, формирователей наносекундных импульсов, схем совпадений и многофункциональных устройств селекции, быстродействующих аналоговых ключей, преобразователей временных интервалов и др. в составе системы наносекундных модулей универсального применения.
3. Методика построения электронной аппаратуры с детекторами, в которых используются протяженные пластмассовые сцинтилляторы, позволяющая снизить уровень шумов и повысить временное разрешение в системах, требующих применения таких сцинтилляторов.
4. Метод передачи информации от нескольких выносных детекторов излучения по одному каналу связи на основе селекции импульсов по длительности и технические средства, которые обеспечивают передачу данных по одному кабель-тросу, от нескольких погружных детекторов, позволяющих определить конфигурацию гамма–поля в водной среде.
5. Методы определения координат ядерных событий вне детекторов излучения на основе временных измерений и селекции для случаев линейного двух- и трех-координатного позиционирования.
6. Технические средства триггерной электроники детектора ТО эксперимента АЛИСЕ в ЦЕРНе, позволяющие определить линейную координату точки столкновения ускоренных в ЛНС ядер, осуществить пространственную селекцию событий в заданной зоне и грубо оценить характер столкновения частиц.
7. Технические средства временной и пространственной селекции в устройствах для обнаружения несанкционированных закладок в маскирующих средах на основе метода меченых нейтронов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

1. .IV Всесоюзный семинар по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смешанных областях. Протвино 29 июля – 1 августа. 1986 г.
2. VII Всесоюзный симпозиум: Модульные информационно – вычислительные системы. Новосибирск. 11 -13 мая 1989.
3. XIV Международный симпозиум по ядерной электронике и Международный семинар КАМАК – 90. 1990. 25 августа – 09 сентября. Варшава.
4. IV Всесоюзная школа « Автоматизация научных исследований в ядерной физике и астрофизике». Ужгород. 08 – 13 октября 1990 г.
5. Восьмой Международный симпозиум по проблемам модульных и информационно – вычислительных систем и сетей ICS – NET `91 (ИВС`91) 1991. Дубна.
6. V Международная школа – семинар «Автоматизация исследований в ядерной физике и астрофизике».1992. 16 – 23 октября. Сочи. ACS – NPA.
7. XVI Международный симпозиум по ядерной электронике и VI Международная школа по автоматизации исследований в ядерной физике и астрофизике. 1994. 12 – сентября. Варна.
8. . Восьмой симпозиум по применению микрокомпьютеров и микропроцессоров Р 94. 1994. 12-14 октября. Будапешт.
9. VII Международная школа – семинар по автоматизации, компьютеризации в науке, технике и промышленности. Москва. 1996.
10. XVII Международный симпозиум по ядерной электронике. Варна. 15 – 21 сентября. 1997.
11. IU и U Международные конференции «Применение полупроводниковых детекторов в ядерно – физических задачах». Рига. Юрмала. 25 – 29 сентября 1995; 18 – 22 мая .1998.
12. XIX Международный симпозиум Ядерная электроника и компьютеринг. Варна. 15 – 20 сентября 2003.
13. Международная научно – техническая конференция
«Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе».2004.
18 – 21 октября. Москва.
14. XX Международный симпозиум NEC`2005. Варна. 12 – 18 сентября. 2005.
15. IV Курчатовская молодежная научная школа. Москва. 20 – 22 ноября. 2006.
16. XXI Международный симпозиум NEC`2007. Варна. 12 – 18 сентября. 2005.

17. Сессия – конференция секции ядерной физики отделения физических наук РАН (ОЯФ РАН). 2007. Москва. 26 – 30 ноября, 2007.
18. XX11 Международный симпозиум NEC`2009. Варна. 7 – 14 сентября. 2009.

Краткое содержание.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы.

Во введении рассматривается актуальность работы, цели и задачи диссертации, новизна работы и ее практическая ценность.

В первой главе диссертации приводится анализ состояния проблемы временной и пространственной селекции, рассматриваются структурные схемы устройств временной селекции, приводится классификация методов селекции. Рассматриваются основные параметры разных видов селекции, в том числе, предлагаемые диссертантом, а также проблема повышения быстродействия селекции.

Устройства временной селекции предлагается классифицировать по следующим параметрам: по характеру селектируемых сигналов (аналоговых или логических); по критериям отбора (одновременность событий, наличие сигнала в заданном окне, соответствие параметров формы заданным); по количеству входов и выходов селектируемых сигналов (одноканальные, многоканальные); по способам обработки сигналов (аналоговые, цифровые или аналого-цифровые).

В физическом эксперименте, когда необходимо регистрировать временные и амплитудные параметры отдельных частиц или квантов проблема быстродействия селекторов имеет первостепенное значение. Для оценки быстродействия разных типов селекторов в зависимости от критериев селекции применяют свои специфические системы параметров. Наиболее проработанной является система оценки параметров схем совпадений, основным параметром которой, определяющим ее быстродействие является разрешающее время. Быстродействие устройства временной селекции с широким окном на наш взгляд удобно характеризовать временем перехода селектора из состояния «выключено» в состояние «включено» и обратно. Для реальных устройств селекции это время зависит от многих факторов, и в конечном счете может быть определено как время изменения относительной интенсивности следования импульсов на выходе селектора в заданных пределах. Удобно считать эффективным временем переключения (ЭВП) время, за которое интенсивность следования сигналов, изменится в интервале от 10% до 90% от максимального значения. Для постоянного сигнала на входе селектора эффективное время переключения ЭВП совпадает с длительностью фронта на уровне 0,1-0,9.

Рассматриваются и некоторые другие параметры устройств временной селекции. Эффективность селекции – доля зарегистрированных событий на выходе селектора от их общего количества, поступившего на вход в заданном временном окне. Мертвое время селектора – время его нечувствительности, которое возникает после каждого акта селекции. Порог чувствительности – технический параметр, характеризующий чувствительность схемы к входным сигналам.

Для селекторов аналоговых сигналов используются все параметры, характеризующие линейность передачи сигнала в открытом состоянии (интегральная и дифференциальная линейность, динамический диапазон и др.), а также параметры, характеризующие погрешности селекции: прохождение сигнала на выход в закрытом состоянии селектора («пролезание») и прохождение управляющего сигнала на выход при отсутствии селектируемого сигнала («пьедестал»).

Для селекторов импульсов по форме главными являются параметры, характеризующие качество разделения. Такими параметрами являются эффективность и избирательность отбора. Из-за флуктуации формы сигнала двум видам сигналов будут соответствовать некоторые средние значения параметров со своими распределениями, наложение которых не позволяет полностью разделить сигналы, обусловленные разными причинами. Под эффективностью отбора понимают относительную долю сигналов, обладающих данной формой и соответствующих условиям отбора, проходящих на выход устройства. Для известной формы распределений и установленной границы отбора эффективность определяется площадью под нормированной кривой распределения до границы отбора. Избирательность отбора выражают долей относительного числа сигналов, не удовлетворяющих условиям отбора, но проходящих на выход, отнесенной к эффективности отбора сигналов, соответствующих условиям отбора. Иногда пользуются параметром – коэффициент блокирования излучения, не соответствующего условиям отбора, представляющим собой отношение его интеграла к доле, проникшей на выход полезных сигналов. Как и для других устройств селекции, важными характеристиками селекторов по форме являются быстродействие и стабильность параметров во времени. Заметим, что быстродействие в данном случае часто ограничено длительностью сигнала, поскольку для принятия решения об его соответствии критериям отбора необходимо использовать всю протяженность информации об его форме.

Для пространственной селекции основными являются параметры, характеризующие пространственное разрешение. В одномерном (линейном) варианте – это минимальное расстояние между отдельно фиксируемыми координатами ядерных

взаимодействий; в двумерном (на плоскости) и трехмерном (объемном) вариантах – это соответственно минимальные размеры пикселей и вокселей, определяющих зону разброса регистрации одного события.

Вторая глава посвящена разработкам технических средств селекции, проведенных диссертантом или при его участии. Рассматриваются нормализаторы и коммутирующие устройства аналоговых сигналов, а также логические средства быстрой селекции, в том числе, схемы совпадений различных типов и многофункциональные устройства. Большое внимание уделено разработкам устройств временной привязки к флюктуирующим случайным сигналам и идентификаторов сигналов по параметрам формы.

Наибольшие трудности встречаются при разработке быстрых усилителей работающих с импульсами нано и субнаносекундной длительности. Известно, что при работе с высокими и меняющимися во времени загрузками на выходе усилителя с емкостными связями происходит смещение уровня постоянной составляющей. Как в амплитудной спектрометрии, так и во временных измерениях, такое смещение в значительной степени искажает информацию, полученную от детекторов излучения. Наиболее эффективный способ устранения смещения уровня – построение усилителя полностью с гальваническими связями. При этом используются либо быстрые операционные усилители (ОУ), либо составные усилители. Предложена нестандартная схема составного усилителя с общей для обоих каналов цепью отрицательной обратной связи. В высокочастотном канале схемы использована разновидность схемы Раша, представляющей собой последовательное соединение каскадов с общей базой (ОБ) и общим эмиттером. Такая схема обладает малым временем запаздывания, что позволяет простыми средствами получить при замкнутой ООС сравнительно малые времена нарастания. В эмиттер транзистора (ОБ) через разделительный конденсатор поступают высокочастотные составляющие спектра, а в базу - низкочастотные составляющие после усиления их операционным усилителем. В рассматриваемой схеме при разорванной цепи обратной связи усиление на низких частотах существенно превышает усиление на высоких частотах. Включение цепи отрицательной обратной связи выравнивает частотную характеристику, при этом к параметрам цепей, определяющим границы разделения частот, не предъявляется жестких требований – важно лишь, чтобы частотные характеристики перекрывались.

Одним из достоинств составного усилителя со схемой Раша в быстром канале является низкомность входа усилителя, обусловленная связью ее с эмиттерной цепью каскада с общей базой, в которой протекает сравнительно большой ток. Это позволяет

эффективно использовать такой усилитель в схемах суммирования наносекундных сигналов от многих датчиков. Одним из примеров такого использования является разработанный нами для детектора ТО эксперимента ALICE в ЦЕРНе дискриминатор множественности, в котором на входе суммируются сигналы длительностью 3-4нс от 12 черенковских счетчиков.

Большое внимание во 2 гл. уделено анализу *устройств временной привязки* (УВП), преобразующим входные сигналы в стандартные импульсы, жестко связанные с признаком сигнала, характеризующим время появления исследуемого события. Именно УВП определяют реальное быстродействие селекции при работе с импульсами детекторов излучений. Рассматриваются УВП, реализующие способы: постоянного порога, пересечения нуля и следящего порога. Анализируются погрешности временной привязки формирователей, связанные с медленным дрейфом порога срабатывания, разбросом момента срабатывания, за счет статистических флуктуаций формы сигнала и наличия шумов ("джиттер"), зависимости момента срабатывания от амплитуды или длительности фронта входного сигнала ("гуляние"), а также зависимостью задержки срабатывания от превышения сигналом порога, обусловленной конечной зарядовой чувствительностью формирователя.

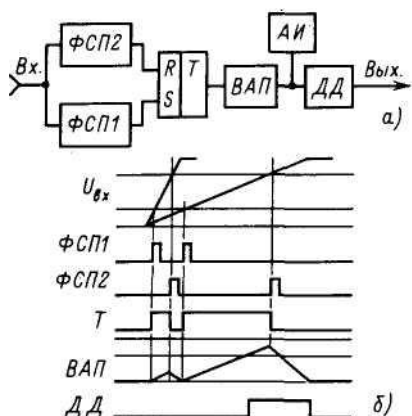
Подробно рассмотрен наиболее совершенный способ широкодиапазонной временной привязки – способ следящего порога, в котором порог срабатывания порогового устройства для каждого входного импульса устанавливается индивидуально в соответствии с его амплитудой. Приводится и анализируется схема, иллюстрирующая принцип действия формирователя со следящим порогом (ФСП). Рассматриваются два режима работы ФСП: режим привязки к постоянной части амплитуды входного импульса – "постоянной фракции" (ПФ) и режим компенсации изменений амплитуды и времени нарастания импульса (КАВ). Последний режим используют в тех случаях, когда изменяется не только амплитуда, но и длительность фронта входных импульсов, например, при работе с германиевыми детекторами большого объема, время сбора заряда в которых варьирует в широких пределах.

Во 2гл. рассматриваются разные варианты реализации ФСП диссертантом и приводятся их характеристики. Так, например, в универсальном ФСП ранней разработки погрешность временной привязки к входным импульсам с фронтом 3; 15 и 100нс составляет соответственно $\pm 0,15$; 0,6 и 2,0нс, в диапазоне амплитуд 0,04-4В. Дальнейшее повышение точности привязки связано с применением более быстродействующих компараторов и оптимизацией схемотехники ФСП. Так,

использование в ФСП компараторов AD96687 с временем задержки 2,5нс и применение дополнительного компаратора для отбора совпадений сигналов амплитудного дискриминатора и ФСП, выходы которых соединены по «проводному ИЛИ» позволило нам снизить погрешность привязки к импульсу с фронтом 2 нс до ± 25 пс в диапазоне амплитуд входных импульсов от 50мВ до 5В.

Далее во 2гл. рассмотрены *дискриминаторы импульсов по форме*, которые служат для идентификации импульсов основного излучения, одновременной регистрации импульсов сопутствующего излучения и для исключения фоновых импульсов.

Для наших перспективных разработок был выбран способ дискриминации по форме, основанный на непосредственном измерении длительности фронта проинтегрированного импульса на заданных уровнях. Его основное достоинство — возможность применения при работе практически со всеми типами детекторов и сравнительная простота схемных решений. Структурная схема основанного на этом принципе дискриминатора импульсов по длительности фронта приведена на рис.1, а. Входной сигнал поступает на входы двух формирователей со следящим порогом ФСП1 и ФСП2. Относительный уровень срабатывания формирователей выбирается на характерных точках фронта: для ФСП1



для ФСП1 $f_1 = 0,15-0,2$; для ФСП2 $f_2 = 0,5-0,8$. Выходной сигнал ФСП1 взводит RS-триггер Т, а сигнал с выхода ФСП2 — сбрасывает его

При равенстве задержек срабатывания ФСП1 и ФСП2 на выходе Т формируется прямоугольный импульс (рис.1,б), длительность которого равна выделенной части фронта входного импульса. Время-амплитудный преобразователь ВАП позволяет при помощи амплитудного анализатора АИ получить спектры времен нарастания импульсов, а дифференциальный

Рис.1. Схема (а) и временные диаграммы (б) дискриминатора импульсов по длительности фронта

дискриминатор ДД — выделять полезные события. Испытания реализующей этот принцип схемы от генератора с регулируемым фронтом показали, что погрешность определения длительности фронта t_{ϕ} при изменении амплитуды входных импульсов в диапазоне 1:50 не превышает 0,5нс для $t_{\phi} = 10$ нс и 2нс для $t_{\phi} = 300$ нс.

Центральным узлом временного селектора, рассматриваемым во 2 гл. является *ключевое устройство*. Именно в нем производится временной отбор необходимого полезного фрагмента из всего потока сигналов и удаление бесполезной информации. В

устройствах временной селекции с наносекундным и субнаносекундным разрешением эту функцию выполняют электронные ключи, выполненные на интегральных схемах (ИС) и специальных транзисторах. Для быстрой коммутации логических (стандартных по уровням) сигналов используются логические интегральные схемы. ЭСЛ ИС позволяют осуществлять коммутацию за доли наносекунды. Для логических сигналов аналогом нормально разомкнутого ключа является режим совпадений, а нормально замкнутого – антисовпадений. Основу устройств наносекундной логики, работающих в реальном масштабе времени, составляют схемы совпадений, методология и практика применения которых рассматривается во 2 и 3 гл. работы.

Простые схемы совпадений-антисовпадений составляют основу многофункциональных блоков, логику работы которых можно изменять программно или вручную в соответствии с требованиями конкретных физических экспериментов. Схемы подобных блоков приведены в приложении

В традиционных схемах совпадений разрешающее время определяется в основном длительностью сформированных логических импульсов и для его изменения в автоматизированных системах приходится использовать сложные формирователи с программируемой длительностью выходных импульсов. В некоторых случаях удобнее использовать простые формирователи, а разрешающее время задавать непосредственно в схеме совпадений. Разработана схема блока совпадений с программируемым разрешающим временем. Особенностью схемы является стабильность задержки выходных импульсов относительно импульсов, поступающих на главный вход. Это позволяет использовать схему в качестве источника старт- и стоп-импульсов при совместной работе с преобразователями временных интервалов. Сведения о других разработках устройств селекции логических импульсов приведены в приложении.

Далее во 2 гл. рассматриваются аналоговые ключи, используемые для селекции и линейной передачи аналоговых сигналов. По количеству селектируемых каналов наши разработки аналоговых ключей условно можно разделить на две категории: линейные схемы пропускания (ЛСП), когда селекция проводится в одном канале и линейные коммутаторы – когда к выходу или входу может быть подключено нескольких каналов

Схемы линейного пропускания наносекундных импульсов обычно выполняются на основе дифференциального каскада, в эмиттерную цепь которого поступает токовый входной сигнал, а управление осуществляется по базе одного из транзисторов каскада. Реализация этого принципа в одной из ранних разработок ЛСП, выполненной на быстрых транзисторах, позволила получить достаточно хорошие характеристики по

быстродействию – время переключения схемы (в режиме «вырубки») составляло 5нс, интегральная нелинейность схемы не более $\pm 2,5\%$ в диапазоне амплитуд 0,5–5В, пьедестал схемы 50мВ, прохождение входного сигнала с фронтом 2нс и амплитудой 15В на выход схемы в закрытом состоянии – не более 10мВ.

В случае работы с наносекундными импульсами для измерения их амплитуд желательно их длительность увеличить до значений соответствующих требованиям стандартных амплитудных анализаторов. Одним из способов такого расширения импульсов является их интегрирование. Включение интегратора на выходе ЛСП приводит к улучшению их метрологических характеристик.

Схема ЛСП наносекундных импульсов, на выходе которой при наличии сигнала управления осуществляется преобразование заряда входного импульса в амплитуду импульса фиксированной длительности приведена в приложении. Она предназначена для работы с входными импульсами длительностью 5 – 30нс и амплитудой до – 5 В. При этом прохождение входного сигнала на выход схемы в отсутствие сигнала управления - не более 3 мВ, прохождение на выход сигнала управления в отсутствие входного сигнала – 10 мВ, амплитуда выходного сигнала до 5 В, длительность – 1 мкс.

Во многих экспериментальных исследованиях информация поступает по нескольким каналам от группы датчиков. В зависимости от требований к скорости и точности регистрации сигналов используют параллельную или последовательную схему опроса измерительных каналов. Основной проблемой при разработке быстродействующих измерителей с последовательным опросом каналов является создание аналогового коммутатора необходимого быстродействия. В коммутаторах умеренного быстродействия обычно используют интегральные ключи напряжения МОП-структуры. К сожалению, эти ключи обладают сравнительно большими паразитными емкостями, что приводит к сквозному прохождению сигнала через закрытый ключ и значительной шунтирующей емкости в открытом канале. Для повышения скорости коммутации предложено использовать интегральные токовые ключи. В отличие от ключей напряжения, в которых управляющий сигнал должен превышать максимальное значение коммутируемого напряжения, токовые ключи управляются сравнительно небольшими перепадами напряжения. Это обстоятельство, а также низкоомность приемника тока, включаемого на выходе токового ключа, позволяют существенно снизить амплитуду и длительность коммутационной помехи, в значительной степени определяющей минимальную длительность цикла коммутации. В гл. 2 приводится функциональная схема 16-канального аналогового коммутатора на токовых ключах. Минимальный период коммутации при малом времени установления сигнала выходного каскада (15нс)

определяется в основном длительностью коммутационной помехи. Для данной схемы эта длительность не превышает 50нс, что позволяет осуществить коммутацию каналов с частотой 10-20 МГц

Для коммутации сигналов повышенного напряжения целесообразно использовать полевые транзисторы с изолированным затвором или IGBT транзисторы. В работе рассматриваются разработки таких ключей на напряжения 500 и 1500 В.

Большинство принципиальных разработок, рассмотренных выше, реализовано в виде функциональных модулей. В целом они составляют систему, которая позволяет оперативно собирать различные схемы регистрации событий в физическом эксперименте с применением временной селекции и прецизионной временной спектрометрии. В состав системы входят несколько вариантов быстрых усилителей, формирователи – дискриминаторы наносекундных импульсов, устройства точной временной привязки, несколько вариантов схем совпадений, блоки задержки логических импульсов, линейные схемы пропускания, преобразователи наносекундных временных интервалов, дискриминаторы импульсов по форме и др. Управление блоками можно производить программно или вручную. Использование управления от ЭВМ по магистрали КАМАК создает условия для автоматизации процессов контроля и коррекции параметров электронных блоков в ходе эксперимента, а также дает возможность автоматизировать процессы настройки и поверки электронных устройств при их производстве.

Особенности и характеристики основных модулей системы приведены в приложении. В заключительной части 2 гл. рассматриваются примеры применения блоков системы в ядерно-физических задачах.

Третья глава работы посвящена разработкам средств временной селекции и спектрометрии для мюонного измерительного комплекса. В первом варианте электронной измерительной системы для экспериментов с мюонами использовались счетчики с пластмассовыми сцинтилляторами и ФЭУ-36, а также схемы временной селекции и входных устройств к ним на основе туннельных диодов и дискретных транзисторов. Система имела физическое временное разрешение, измеренное на пучке π -мезонов 1,5 нс при размере сцинтилляторов 15·15см². Использование этой измерительной системы позволило провести ряд экспериментов по изучению свойств вещества с помощью μ -мезонов и обнаружить интересное физическое явление двухчастотной прецессии мюонов в магнитном поле, зарегистрированное в качестве открытия.

В связи с усложнением экспериментов и увеличением их длительности, а также ростом числа измерительных каналов в дальнейшем была проведена модернизация измерительной аппаратуры с целью улучшения ее конструктивно-эксплуатационных

характеристик. Новый вариант аппаратуры был выполнен в виде блочно–модульной системы. По сравнению с первым вариантом системы в новой модульной системе удалось значительно улучшить метрологические характеристики измерений. Так высокое временное разрешение обеспечивается применением формирователей со следящим порогом и схемы компенсации геометрических размеров больших пластмассовых сцинтилляторов; малая дифференциальная нелинейность и высокая точность воспроизведения временных спектров – использованием прецизионных временных преобразователей, а также специального логического блока для исключения «наложенных» событий. Хорошие загрузочные характеристики обеспечиваются применением гальванических связей в блоках, а также использованием дифференцирования непосредственно на входе формирователей импульсов детекторов. Универсальная схема совпадений, входящая в состав системы, позволяет работать не только в режиме одно-, двух-, трех – или четырехкратных совпадений, но и в режиме антисовпадений с одним, двумя или тремя каналами запрета. В сочетании с формирователями, имеющими весьма малое время восстановления, такая схема позволяет осуществить высокую эффективность запрета, что бывает необходимо при подавлении во временном спектре интенсивной линии от частиц, пронизывающих все счетчики.

Модернизированный вариант установки для экспериментов с мюонами (рис.2) состоит из системы сцинтилляционных счетчиков и электронной измерительной аппаратуры. Сцинтилляционные счетчики помещены внутри электромагнита, создающего поле величиной 0–8кЭ перпендикулярное пучку мюонов. Поляризованные мюоны из ускорителя останавливаются в мишени М из исследуемого вещества. Остановка мюонов в мишени и вылет электронов μ -е-распада регистрируются сцинтилляционными детекторами I–V. Детекторы II–IV выполнены из полистирола с p-терфенилом и РОРОР, они имеют размеры $150 \cdot 150 \cdot 10 \text{ мм}^3$. Детекторы I и V выполнены из сцинтилляционной пластмассы NE-110; размеры детектора I – $100 \cdot 100 \cdot 20 \text{ мм}^3$, детектора V – $150 \cdot 150 \cdot 20 \text{ мм}^3$. Детекторы II – V просматриваются с одной стороны фотоумножителями ФЭУ–36 через световоды из оргстекла длиной 600 мм. Детектор I, определяющий время остановки мюона в мишени, просматривается с двух сторон фотоумножителями ХР–1021 с целью компенсации геометрического разброса; длина световода – 200 мм. Детектор V, определяющий время вылета электрона из мишени, выполнен аналогично, длина световодов в нем – 600 мм.

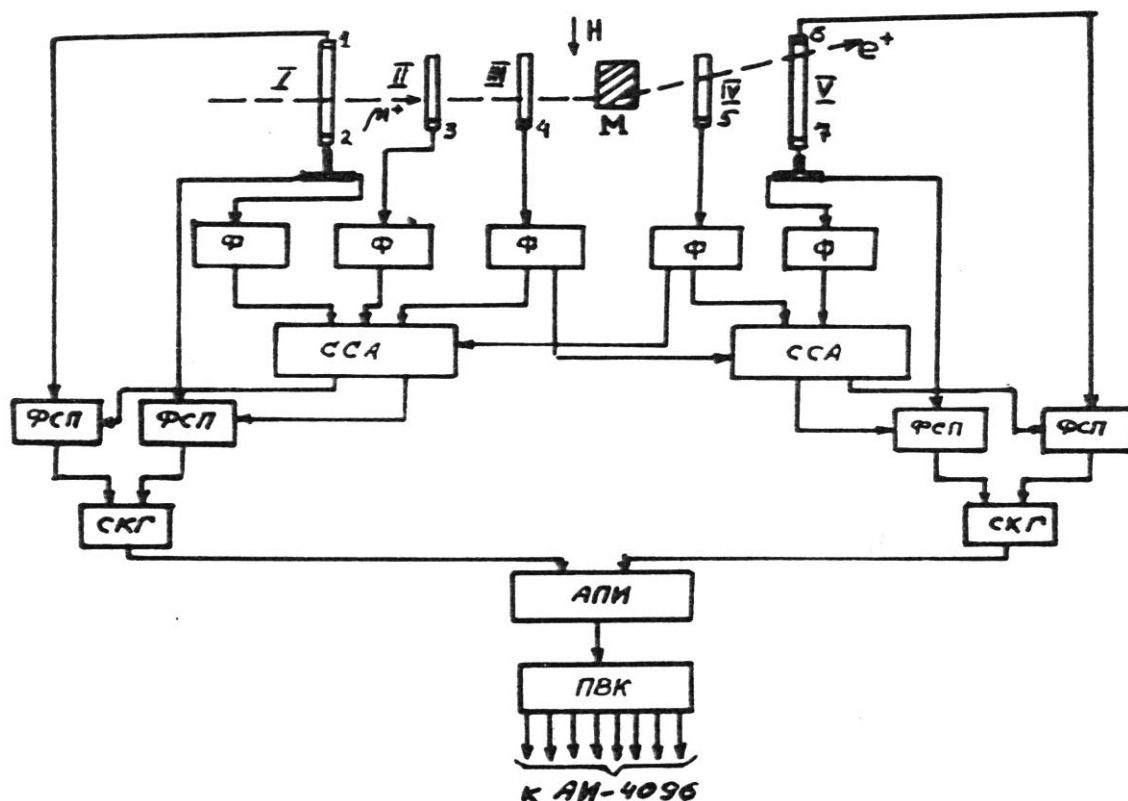


Рис.2. Схема установки для экспериментов с мюонами

Остановки мюонов в мишени М определяются логическим сигналом 234⁵ схемы совпадений–антисовпадений (ССА), которая управляет двумя формирователями со следящим порогом ФСП. Сигналы с ФСП подаются на схему «компенсации геометрии» (СКГ), выходной сигнал которой определяет время попадания мюона в мишень («старт») независимо от места прохождения мюоном сцинтиллятора I. Вылет электрона μ -е-распада из мишени определяется логическим сигналом 57⁴ схемы ССА, которая управляет соответствующими ФСП счетчиков 6 и 7. Сигналы с выходов формирователей поступают на схему СКГ, выходной сигнал которой определяет время вылета электрона μ -е-распада – «стоп». Сигналы старт и стоп подаются на временной анализатор, состоящий из аналогового преобразователя коротких временных интервалов АПИ с коэффициентом преобразования 100, преобразователя время-код ПВК с опорной частотой 200 МГц и накопителя АИ-4096. При ширине канала 55пс дифференциальная нелинейность анализатора на 80% временной шкалы ($T=150$ нс) составляет $\pm 1\%$. Созданный вариант временного спектрометра предназначен для наблюдения прецессии μ -мезонов в тех случаях, когда частоты прецессии слишком велики и их невозможно наблюдать с помощью обычных спектрометров, с временным разрешением порядка 1нс.

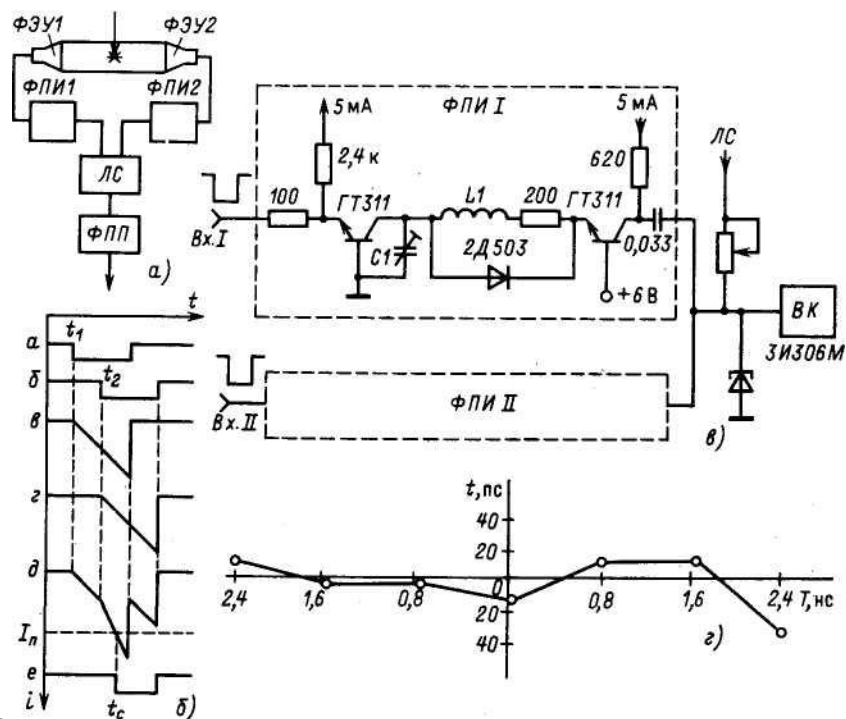


Рис.3. Временная привязка к середине изменяющегося интервала: а—функциональная схема; б—временные диаграммы; в— принципиальная схема; г— кривые, характеризующие точность привязки

Известно, что во временных спектрометрах с большими ($\geq 100\text{мм}$) сцинтилляторами заметное влияние на временное разрешение оказывает разброс времени прохождения света от места сцинтилляции до ФЭУ. Один из способов ослабления этого влияния состоит в том, что противоположные грани сцинтиллятора "просматривают" два ФЭУ (рис.3, а). Импульсы на выходе каждого ФЭУ запаздывают относительно момента возникновения сцинтилляции на постоянную величину, связанную с задержкой в ФЭУ, и переменную величину, связанную с временем прохождения светом расстояния до соответствующего ФЭУ. При этом сумма времени запаздывания остается постоянной, а середина временного отрезка между моментами появления импульсов на выходах обоих ФЭУ жестко связана с моментом попадания частицы в сцинтиллятор. В установке использовано оригинальное устройство, предназначенное для временной привязки к середине изменяющегося временного интервала, основанное на использовании пилообразных импульсов. В отличие от других схем аналогичного назначения устройство одновременно выполняет функцию схемы совпадений, исключая появление на выходе ложных импульсов, связанных с шумами и помехами. Структурная схема устройства (рис.3, а) состоит из формирователей пилообразных импульсов ФПИ, линейного сумматора ЛС и формирователя с постоянным порогом ФПП.

На входы $\Phi\Pi\Pi$ поступают импульсы $\PhiЭУ$, в моменты прихода которых t_1 и t_2 $\Phi\Pi\Pi$ начинают вырабатывать импульсы тока (рис.3,6), нарастающие по линейному закону:

$$i_{1,2} = k(t - t_{1,2}).$$

откуда момент срабатывания дискриминатора t_c определяется при $i=I_n$:

$$t_c = I_n / 2k + (t_1 + t_2) / 2$$

где I_n — порог срабатывания ФПП.

Поскольку $t_1 + t_2$ — величина постоянная, t_c жестко связан с серединой временного интервала, начало и конец которого заданы моментами t_1 и t_2 . Если при этом $I_m < I_n < 2I_n$, где I_m — амплитуда пилообразного импульса, схема не срабатывает от одиночных импульсов и кроме функции временной привязки выполняет функцию схемы совпадений.

В принципиальной схеме устройства (рис.3, в) для формирования пилообразных импульсов тока используется задемпфированный колебательный контур ($L1C1$), на вход которого через согласующий транзистор подают стандартизованные импульсы от $\PhiЭУ$. Длительность импульсов определяет длительность линейно нарастающего участка, частота и добротность контура — скорость нарастания тока в контуре.

По сравнению с другими простыми способами формирования коротких пилообразных импульсов (например, интегрирующей RC-цепью) такой способ позволяет получить пилообразные импульсы тока с меньшим обратным ходом, что дает возможность снизить разрешающее время по совпадениям. На рис.3,г представлены характеристики устройства, полученные с помощью генератора и дифференциальной линии задержки. Погрешность временной привязки к середине временного интервала, изменяющегося в пределах $\pm 2,4$ нс, составила ± 25 пс, при этом разрешающее время схемы по совпадениям равно 10 нс.

Временное разрешение спектрометра, измеренное на пучке μ -мезонов синхроциклотрона ОИЯИ, оказалось равным 320 пс. Приведенные в гл.3 оценки показывают, что при таком разрешении можно наблюдать периоды прецессии μ -мезонов $T_\mu \geq 0,7$ нс

Кроме высокого временного разрешения спектрометрия мюонных исследований требует малой дифференциальной нелинейности, что связано с необходимостью наблюдения прецессионных спектров при минимальном коэффициенте асимметрии μ - e -распада. Для снижения дифференциальной нелинейности в первоначальную структуру аппаратуры были введены дополнительные селекторные устройства, обеспечивающие исключение генетически не связанных стартов и стопов, а также наложенных событий и событий из начальной части макроимпульсов ускорителя.

Основное внимание было уделено разработкам новых способов преобразования коротких временных интервалов. Для модернизированного варианта мюонного измерительного комплекса первоначально был разработан преобразователь время-код (ПВК) с минимальной шириной канала $h=5$ нс. Это значение определялось максимальной частотой имевшихся в то время интегральных счетчиков – 200 МГц. Испытания показали, что при частоте опорного генератора 100 МГц дифференциальная нелинейность ПВК составляет 1%. С увеличением частоты нелинейность возрастает и на частотах до 200 МГц она составляет 2.5 %. При этом в контрольном спектре заметны искажения типа «чет–нечет» и периодичности более высокого порядка, например, «четверение». Нелинейности такого рода связаны, по-видимому, с тем, что при высоких частотах переключения, даже выходные сигналы первого триггера имеют заметный амплитудный разброс. Использование фазировки конца интервала с импульсами опорного генератора позволило снизить дифференциальную нелинейность ПВК при частоте опорного генератора 200МГц до 0,5%. Фазирующее устройство необходимо для того, чтобы свести к минимуму количество разрезанных импульсов. Оригинальная схема фазирования на основе D-триггеров использована нами в разработке ПВК с частотой опорного генератора 500 МГц. Преобразователь имеет следующие характеристики: минимальная ширина канала 2нс, число уровней квантования 4095, мертвое время $t_d+0,2$ мкс, дифференциальная нелинейность $\pm 2,5\%$. Дальнейшее снижение дифференциальной нелинейности до $\pm 1,25\%$ достигнуто введением в схему ПВК оригинальной системы статистического усреднения ширины каналов.

На оптимизированных вариантах измерительного комплекса успешно проведены эксперименты по: изучению диффузии μ^+ -мезона; измерению магнитного поля в ферромагнетиках; изучению магнитных фазовых переходов; исследованию сверхпроводников; точному измерению частоты сверхтонкого расщепления мюония в кварце – $\nu=4438\pm 8$ МГц (точность определения по сравнению с ранее полученной величиной повышена в 10 раз). На рис.4 представлен спектр двухчастотной прецессии спина μ^+ -мезона в плавленом кварце в поле $H=400$ Э

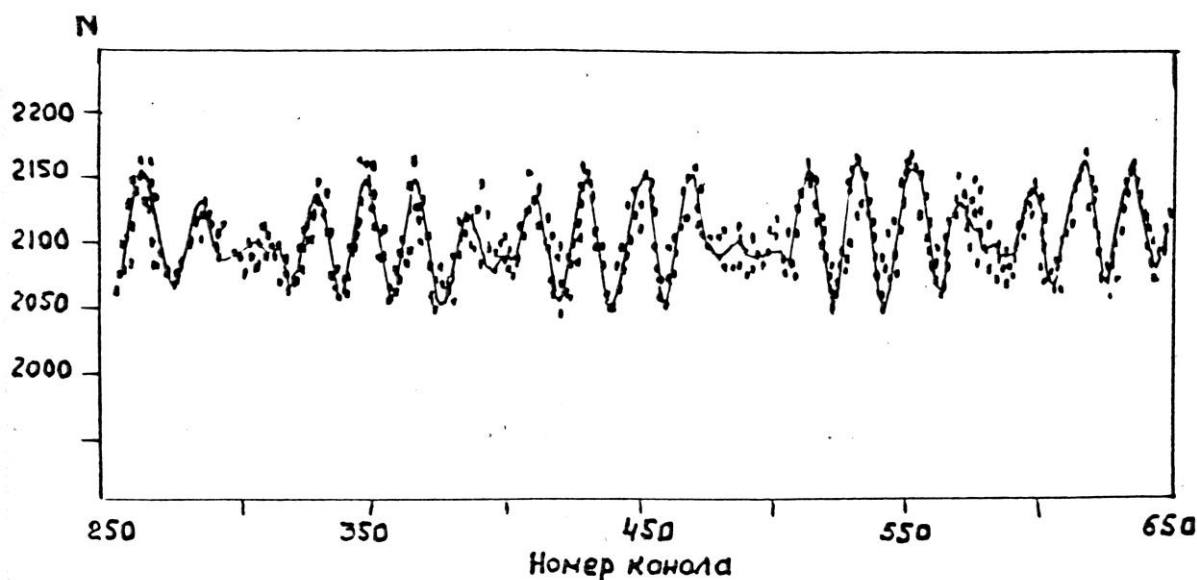


Рис.4. Спектр двухчастотной прецессии спина μ^+ -мезона в плавленном кварце ($h=0,1$ нс/канал).

Четвертая глава диссертации посвящена разработке средств селекции импульсов по форме и созданию на их основе мобильных аппаратных комплексов для оперативного измерения гамма-поля внешней среды.

Созданные спектрометрические комплексы для дистанционного измерения гамма-полей внешней среды условно можно разделить на две категории: комплексы с детектором удаленным от основной регистрирующей аппаратуры и комплексы с детектором, размещенным в непосредственной близости от регистрирующей аппаратуры. В первом случае детектор находится вблизи измеряемого фрагмента гамма-поля, и основной проблемой в режиме непрерывных измерений является передача спектрометрической информации в аппаратуру приема и обработки информации с требуемой оперативностью. Такая оперативность необходима при поиске подвижных объектов гамма-излучения или при быстром перемещении детектора относительно стационарного поля. Во втором случае, для обнаружения и идентификации гамма-источников с помощью мобильных комплексов воздушного и наземного базирования на дальностях 100–200м регистрирующая аппаратура комплексов должна иметь чувствительность, достаточную для получения значимой счетности – с тем, чтобы за эффективное время экспозиции, которое определяется скоростью носителя мобильной аппаратуры, было зарегистрировано статистически значимое число полезных событий. При известном уровне естественного фона и прочих равных условиях чувствительность регистрирующей аппаратуры определяется эффективностью регистрации и рабочей площадью детектора. Таким образом, при создании спектрометрических комплексов для

дистанционного измерения гамма-поля внешней среды необходимо решить две основные проблемы: организация оперативной связи блоков детектирования с аппаратурой сбора и обработки информации и повышения чувствительности измерений. Обе эти проблемы удастся решить применением временной селекции импульсов по критериям длительности и одновременности срабатывания.

В 4 главе рассматриваются три варианта аппаратуры для измерения гамма-поля: в тропосфере и атмосфере; в морской среде; на земной поверхности. В каждом варианте аппаратное обеспечение основано на применении своего нетрадиционного способа временной селекции. В первом варианте – это селекция импульсов, длительность которых несет информацию об энергии излучения. Во втором варианте селекция по длительности позволяет определить номер сработавшего детектора. В третьем варианте с помощью селекции по длительности импульса определяется тип сцинтиллятора, зарегистрировавшего гамма-квант в составном детекторе повышенной чувствительности.

Одной из наших ранних разработок, в которой использовалась селекция импульсов по длительности, была методика измерений гамма-поля в *стратосфере и тропосфере* с помощью радиозондов. Интерес к этой работе был вызван необходимостью изучения закономерностей глобального распространения радиоактивных продуктов ядерных взрывов в стратосфере.

Разработанная нами аппаратура радиозонда включала сцинтилляционный детектор, схему преобразования (A-t) амплитуды импульса в длительность импульса управления радиопередатчиком, радиопередатчик и бародатчик. Наземная (бортовая) аппаратура состояла из УКВ приемника, схемы обратного преобразования (t-A) и 100-канального амплитудного анализатора. Диапазон энергий гамма-лучей, регистрируемых радиозондом, устанавливался обычно в пределах от 0,15 до 1,5 МэВ, что соответствовало длительности радиоимпульсов от 100 мкс до 1 мс. Измерения проводились на борту исследовательского судна «Воейков», выполнявшего разрез вдоль меридиана 180° от 48° с.ш. до 41° ю.ш. в Тихом океане.

Метод регистрации гамма-излучения *под водой* реализован на основе использования сцинтилляционных детекторов с пластмассовыми сцинтилляторами. Вместе с аппаратурой предварительной обработки детекторы размещались в герметичных контейнерах, которые буксировались в подводном положении с помощью кабель-троса, соединяющего выносные детекторы с исследовательским судном.

Для детектирования слабых потоков гамма-излучения необходимы детекторы больших размеров, потому что в первом приближении чувствительность метода пропорциональна площади осевого сечения сцинтиллятора. Предварительные расчеты

показали, что для этих целей могут оказаться перспективными пластмассовые сцинтилляторы с большим отношением длины к диаметру (200х20см), изготовленные на основе полистирола или полиметилметакрилата. Такой детектор обеспечивает радиометрию гамма-излучения при энергии от 0,1 МэВ и выше и возможность оценки его спектрального состава. По сравнению с неорганическими кристаллами пластмассовые сцинтилляторы обладают рядом преимуществ, главными из которых являются более простая технология изготовления, а также хорошие оптические качества при высокой механической и температурной устойчивости. Их недостатками являются худшая разрешающая способность и высокий эффективный уровень собственных шумов ФЭУ в низкоэнергетической области (0,03-0,5МэВ). Последнее обстоятельство резко снижает пороговую чувствительность аппаратуры к гамма-излучениям с энергией гамма-квантов, лежащей в указанном диапазоне и даже к гамма-квантам со сравнительно высокой энергией. В 4гл. рассматриваются методы борьбы с шумами, из которых наиболее эффективен метод совпадений. В этом случае сцинтиллятор сочленяется с двумя ФЭУ, выходные импульсы которых после соответствующего усиления подаются на схему совпадений, вырабатывающей импульсы только от совпавших по времени сигналов. Если необходимо сохранить информацию об амплитуде импульсов, сигналы с ФЭУ через линейный сумматор подаются к схеме линейного пропускания, управляемой выходными импульсами схемы совпадений. Энергетический эквивалент шумов в таком устройстве определяется интенсивностью случайно совпавших шумовых импульсов.

Электроника измерительного комплекса (рис. 5) для измерения гамма-поля водной среды состоит из двух видов аппаратуры: расположенной на борту судна–буксировщика аппаратуры приема информации АПИ, поступающей от погружных детекторов и электронных устройств предварительной обработки информации, расположенных в герметичных контейнерах погружных детекторов ЭУД.

Предварительная обработка спектрометрической информации электронными устройствами, расположенными в непосредственной близости к детектору ионизирующих излучений, предполагает снижение собственных шумов ФЭУ, стабилизацию измерительного тракта по светодиоду, формирование выходных импульсов и передачу спектрометрической информации по линии связи. В качестве такой линии используется одножильный кабель–трос, что существенно упрощает эксплуатацию системы в морских условиях. Для оперативного снятия (за один проход корабля–буксировщика) пространственной картины (на различных глубинах) гамма-поля в морской воде к кабель-тросу предусмотрено подсоединение до 12-ти выносных детекторов излучения. Для передачи по одной линии связи информации от нескольких удаленных от

регистрирующей аппаратуры детекторов излучения разработана оригинальная система передачи данных, основанная на принципах селекции импульсов по длительности. В этой системе существенным признаком принадлежности информации конкретному детектору излучения является длительность выходного сигнала электронных устройств данного детектора. На приемный конец линии связи спектрометрическая информация поступает в виде последовательности импульсов различной длительности, амплитуда которых изменяется в широком динамическом диапазоне. Необходимо по длительности импульса идентифицировать тот выносной детектор, с которого пришел сигнал, нормализовать амплитуду и длительность сигнала для последующего преобразования в цифровой код, записать цифровой эквивалент амплитуды в отведенную для каждого выносного детектора область памяти запоминающего устройства. В дальнейшем эта информация может быть перенесена в оперативную память ЭВМ для математической обработки и визуализации. Для реализации этого метода предложен принцип действия и разработано оригинальное устройство точного определения длительности импульсов с пологими (из-за прохождения по кабелю с ограниченной полосой) фронтами ($>1\text{ мкс}$) и амплитудами, изменяющимися в широком динамическом диапазоне (>40). Анализ длительности импульсов в нем производится при помощи *ФСЦ*, который осуществляет временную привязку, как к переднему фронту входного сигнала, так и к заднему. Задачу установления соответствия между длительностью импульса и номером выносного детектора излучения, от которого пришел данный импульс, решает блок временного преобразования, входящий в состав регистрирующей и анализирующей аппаратуры, размещенной на борту корабля-буксировщика. Из этого блока управляющие сигналы в виде позиционного четырехразрядного кода поступают на линейные пропускатели, на выходе которых появляются нормализованные по длительности сигналы выносных детекторов, поступающие затем на вход блока преобразования амплитуды импульса в цифровой код. Результат преобразования параллельно сопровождается двоичным кодом номера выносного детектора, и данная цифровая комбинация является адресом для накопления информации в блоке оперативно-запоминающего устройства (ОЗУ). Таким образом, передаваемая спектрометрическая информация от каждого выносного детектора излучения накапливается в своей области ОЗУ.

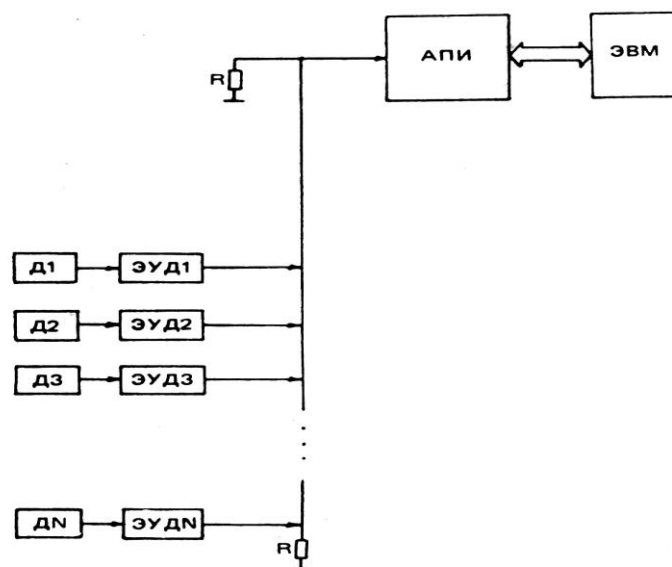


Рис.5. Структура измерительного комплекса для измерения гамма-поля водной среды

В целом данная система передачи и обработки спектрометрической информации в рабочем диапазоне изменения амплитуд импульсов 1:40 по сравнению с эквивалентной ей 12-разрядной системой передачи информации цифровыми методами (для данной линии связи длительность одного бита кодовой последовательности амплитуды сигнала — 8 битов и номера выносного детектора — 4 бита должна быть не менее 1 мкс) позволяет в 2—3 раза уменьшить искажения спектрометрической информации из-за наложений импульсов отдельных детекторов в общей линии связи. При этом паразитное прохождение сигналов в соседние каналы не превышает 0,1% общего числа событий, что позволило отказаться от применения спектрометрических АЦП для каждого выносного детектора. Натурные испытания системы в двух морских экспедициях подтвердили работоспособность и эффективность предложенного технического решения.

Далее в 4гл. рассматривается схема и принцип работы цифрового спектрометра разработанного для отбора по форме и регистрации энергии гамма-квантов от детектора со сцинтиллятором комбинированного типа ($\text{NaI}[\text{Tl}] + \text{CsI}[\text{Tl}]$). В электронике спектрометра использованы цифровой регистратор с частотой дискретизации 40 МГц и ПЛМ для предварительной цифровой обработки. Спектрометр работает в диапазоне от 0.05 до 5 МэВ и имеет повышенную чувствительность в области малых энергий. Алгоритм разделения сигналов по форме в спектрометре реализуется в узле логики формирования спектров и работает по принципу измерения времени нарастания проинтегрированного сигнала до двух относительных уровней: нижнего и верхнего. Если время нарастания до заданных относительных уровней лежит в пределах от T_{NaI} до T_{CsI} , то это смешанное событие и следует запустить алгоритм выделения доли энергий. Если

число циклов соответствует быстрому кристаллу (T_{NaI}) узел логики формирования спектров добавляет единицу в спектр быстрого кристалла, если число циклов соответствует медленному кристаллу (T_{CsI}) добавляет единицу в спектр медленного кристалла. Величины T_{NaI} и T_{CsI} являются порогами, между которыми работает алгоритм разделения смешанных событий. Все промежуточные значения числа циклов ($T_{NaI} \div T_{CsI}$) должны запускать алгоритм выделения доли энергии в быстром и медленном кристаллах, добавлять единицу в спектр смешанных событий регистрации и наращивают счётчик числа смешанных событий.

Измеренное в цифровом определителе максимума сигнала значение пропорциональное энергии умножается на относительные уровни, и ищутся в ОЗУ номера тактов оцифровки n_1 и n_2 при которых значение сигнала наиболее близко соответствуют полученным значениям.

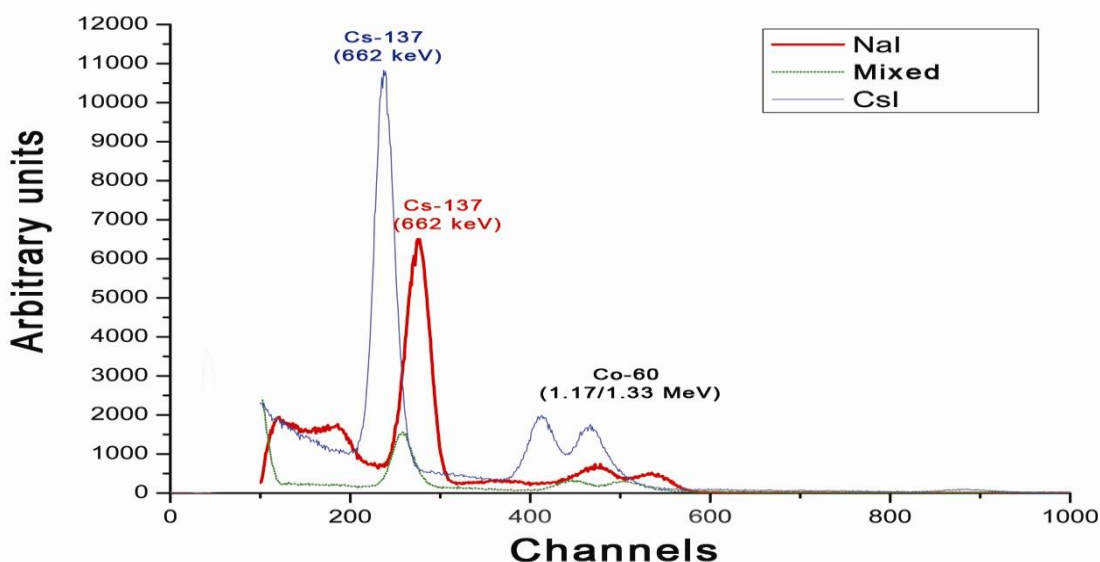


Рис.6. Результаты испытаний спектрометра со сцинтиллятором комбинированного типа.

Некоторые из полученных в результате испытаний спектров приведены на рис. 6. Они иллюстрируют высокое качество разделения сигналов от разных кристаллов и достаточно хорошее энергетическое разрешение спектрометра ($\approx 10\%$).

Пятая глава работы посвящена разработкам методов определения координат ядерных событий вне рабочего объема детекторов излучений и созданию измерительных комплексов на основе этих разработок.

Для пространственной реконструкции процессов, происходящих в исследуемых объектах под воздействием облучений или вследствие распада изотопов необходимо регистрировать координаты ядерных событий, происходящих в них. Такими событиями

являются упругое и неупругое рассеяние нейтронов в веществе, столкновение ускоренных ядер в коллайдерах, аннигиляция позитронов в медицинской томографии и др.

Актуальность разработки методов определения координат ядерных событий такого рода связана в первую очередь с созданием новых технологий для предотвращения незаконного оборота опасных веществ, развитием ядерной медицины, а также с новым этапом фундаментальных исследований на адронных коллайдерах, где изучаются столкновения тяжелых ядер, ускоренных до релятивистских скоростей. Электронные методы определения координат ядерных событий основаны на применении временных измерений и селекции. Наиболее простым и наименее точным методом определения координат является регистрация остановок ускоренных частиц в мишени заданных размеров. Задача решается с помощью схем совпадений – антисовпадений, сигналы на которые поступают от телескопа сцинтилляционных счетчиков, расположенных до и после мишени по отношению к направлению пучка. Более точное определение координат взаимодействия частиц производится путем измерения времени пролета частиц до базовых детекторов, регистрирующих эти частицы.

В гл.5 рассматриваются случаи, когда необходимо получить информацию о позиции событий на одной координатной оси(1D), на плоскости(2D) и в объеме (3D).

Методика *линейного* определения координат и ее реализация представлены в работе разделом, посвященном детектору T0 эксперимента ALICE, проводимого в ЦЕРН, где исследуется возможность наблюдения экзотического состояния вещества, называемого кварк-глюонной плазмой. Детектор T0 должен регистрировать момент времени столкновения встречных ускоренных частиц с точностью около 50пс для идентификации вторичных частиц, рожденных в столкновении. Кроме того, детектор T0 определяет с точностью порядка единиц сантиметров точку столкновения частиц для выделения сигналом $T0_v$ событий, находящихся в апертуре установки Детектор T0 состоит из двух сборок черенковских счетчиков по 12 с каждой стороны (рис.7). Сигналы от каждого фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) сборки поступают к модулям быстрой электроники, на выходах которой формируются сигналы старта (A) и стопа (C) для преобразователя TVDC, вырабатывающего сигнал $T0_v$, а также временного усреднителя, который вырабатывает сигнал, жестко связанный с моментом столкновения встречных ускоренных частиц.

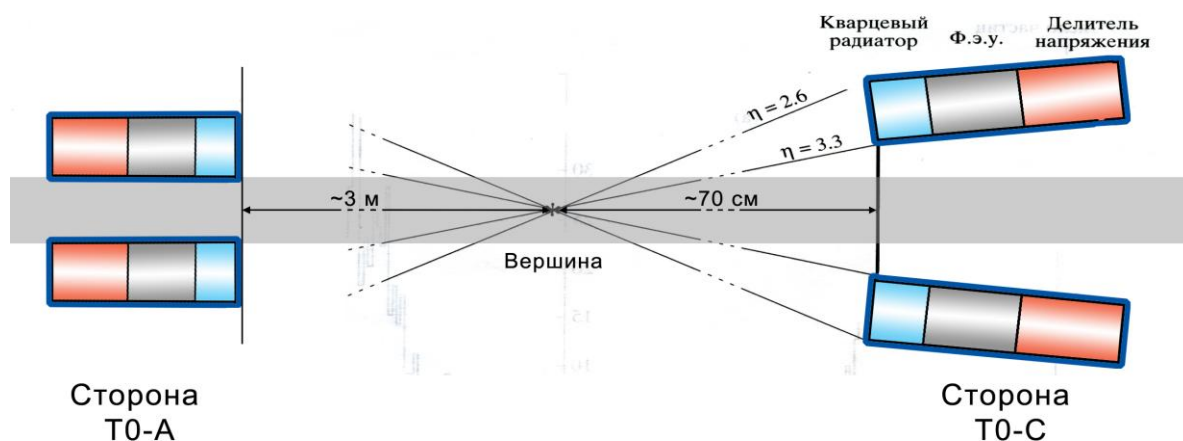


Рис.7. Расположение черенковских счетчиков в детекторе T0.

Ключевым элементом электронной аппаратуры детектора T0 является временной преобразователь TVDC, реализующий функции нахождения координаты взаимодействия ускоренных ядер и выработки сигнала $T0_V$, соответствующего положению точки взаимодействия в заданной зоне. Основные параметры разработанного преобразователя определяются протяженностью зоны взаимодействия частиц (0,7м), заданной погрешностью измерений (± 2 см) и рабочей частотой ускорителя LHC (40МГц).

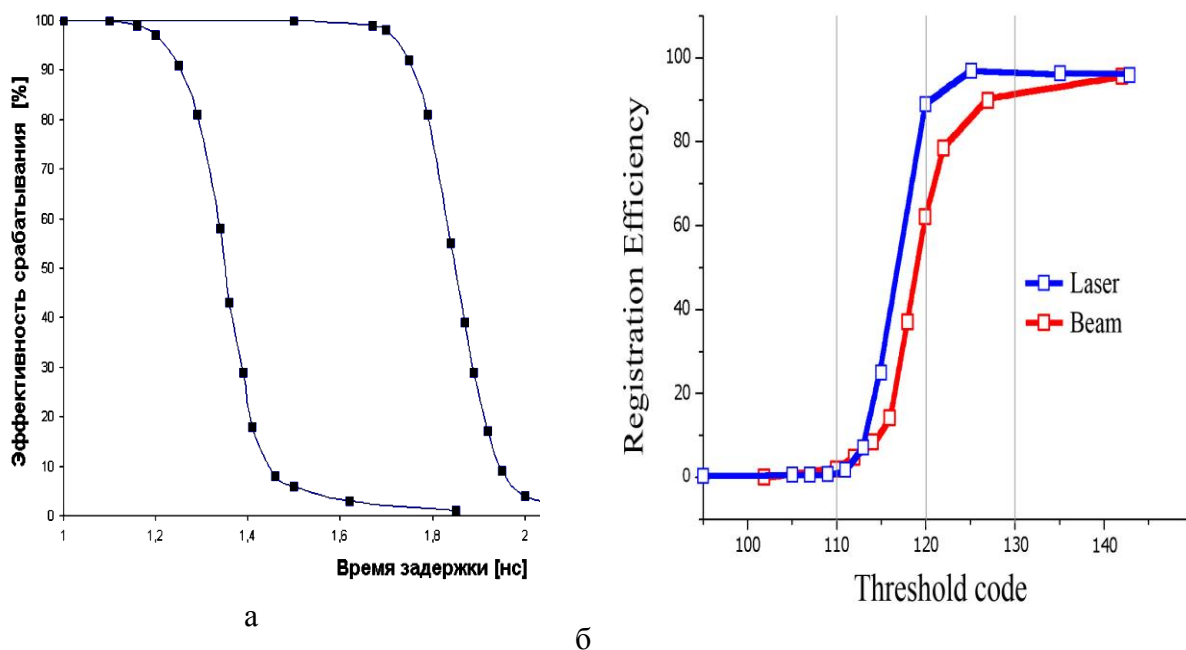


Рис.8. Зависимости эффективности срабатывания TVDC от порогов дискриминации (шаг порога 20пс).

В соответствии с этим заданы следующие параметры TVDC: диапазон кодируемых интервалов $\pm 2,5$ нс (5нс), шаг квантования – 20пс (для 8-разрядного преобразования),

мертвое время преобразования – не более 25нс. Заданные параметры удалось обеспечить использованием время-амплитудного преобразователя и параллельного АЦП с цифровым дискриминатором для выделения сигнала $T0_{\gamma}$. Границы окна цифрового дискриминатора устанавливаются по магистрали VME с 8-разрядной точностью. В работе приводится схема TVDC и результаты его испытаний в ЦЕРНе. На рис. 8 представлены зависимости эффективности срабатывания от нижнего (а) и верхнего (б) порогов дискриминации, снятые на ускорителе ЦЕРН в условиях реального эксперимента. Для сравнения на рис. 8,б приведена кривая, полученная с помощью калибровочного лазера. Наклон кривых характеризует реальное временное разрешение использовавшихся черенковских счетчиков.

Методика *двумерного* определения координат в гл.5 представлена разработками аппаратуры для ПЭТ – позитронно-эмиссионного томографа, принцип действия которого основан на введении пациенту позитронно–активного радиофармацевтического препарата, избирательно поглощаемого и скапливающегося в определенной области головного мозга. Здесь позитроны аннигилируют, порождая два противоположно направленных гамма-кванта с энергией 511 кэВ. Далее применяется метод совпадений, когда два фотона регистрируются в двух детекторах с образованием сигналов, одновременное появление которых приводит к срабатыванию схемы совпадений. Обработка на ЭВМ сигналов с большого числа детекторов, расположенных кольцом, приводит к восстановлению изображения объекта. Позиционное разрешение кольца ПЭТ определяется минимальной толщиной, используемых в нем сцинтилляторов, что при заданном диаметре кольца (~60см) приводит к необходимости иметь в кольце несколько сотен сцинтилляционных пластин. Оптимизация аппаратуры предварительной обработки сигналов ПЭТ в первую очередь связана с сокращением числа ФЭУ, просматривающих одну пластину. В этом плане весьма интересным было предложение использовать в ПЭТ годоскопические ФЭУ – ГФЭУ, представляющие собой позиционно-чувствительные фотоумножители с одним каналом съема информации. Координата точки засветки вдоль фотокатода определяется по времени дрейфа фотоэлектронов в протяженной катодной камере в скрещенных электрическом и магнитном полях. В позиционно-чувствительном детекторе гамма-квантов – элементе кольца ПЭТ на основе ГФЭУ (рис.9а.) примерно 60 сцинтилляционных пластин (1) размерами $3 \times 10 \times 25 \text{ мм}^3$ соединяются индивидуальными световодами (2) с фотокатодом ГФЭУ. Через другие грани сцинтилляционные пластины с помощью световодов (3) соединяются с двумя ФЭУ-143. При попадании гамма-кванта в одну из

сцинтилляционных пластин импульс с любого ФЭУ-143 служит стартовым сигналом временного кодировщика, импульс с ГФЭУ – стоповым сигналом. Номер сцинтилляционной пластины, в которую попал гамма-квант, однозначно определяется величиной временного интервала между стартом и стопом.

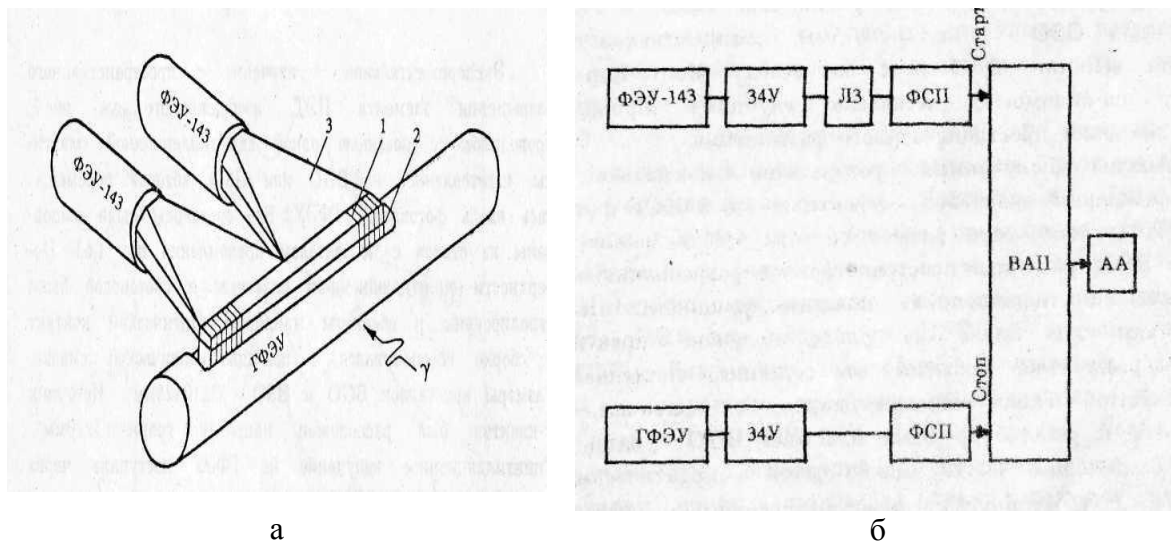


Рис. 9.Элемент ПЭТ на основе ГФЭУ(а) и схема съема информации с него(б).

Разработана схема съема информации с элемента ПЭТ (рис.9,б), состоящая из зарядо-чувствительных усилителей (ЗЧУ), формирователей со следящим порогом (ФСП) преобразователя время-амплитуда (ВАП) и амплитудного анализатора (АА). С помощью этой схемы было измерено временное разрешение в сборке из двух ФЭУ-143, просматривающих одну пластину ВГО через стандартные световоды. Оно оказалось равным 3,6нс. Таким образом, собственное временное разрешение ФЭУ-143 составляет $3.6/\sqrt{2}=2.6$ нс, что при удельной задержке фотоэлектронов в ГФЭУ 40нс/см соответствует эффективному пространственному разрешению 0.7мм. Временное и пространственное разрешение в сборке из ГФЭУ и ФЭУ-143 равно для ВГО – 14.5нс и 3.6мм, для GSO– 7нс и 1.75мм, соответственно. Таким образом, наряду с традиционным решением (одна пластина – один фотоумножитель), с помощью ГФЭУ можно достичь практически предельного собственного пространственного разрешения детекторов и соответственно, всего кольца ПЭТ.

В 5гл. представлена и схема аппаратуры для смешанного варианта, где один ФЭУ анализирует 4 сцинтилляционных кристалла. С одной стороны это позволяет снизить число ФЭУ по сравнению с системой один ФЭУ – один кристалл, с другой

стороны, позволяет исключить сложные аналоговые схемы, необходимые в первом варианте.

Заключительный раздел 5гл. посвящен аппаратному обеспечению **объемного определения координат** методом меченых нейтронов (ММН). Актуальность этой методики определяется тем, что использование меченых нейтронов позволяет сравнительно простыми средствами определять местоположение опасных объектов в массе маскирующих материалов. В целом применение нейтронных технологий позволяет решать целый ряд антитеррористических задач: контроль багажа пассажиров на наличие несанкционированных вложений; контроль авиационных, грузовых и морских контейнеров; идентификацию типов ВВ в снарядах и других контейнерах; идентификацию мин в стенах и грунте. Для определения координат опасного объекта и идентификации его химического состава можно использовать как упругое, так и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах объекта. “Метить” нейтроны возможно благодаря регистрации сопутствующей α -частицы, которая образуется при бомбардировке тритиевой мишени ускоренными ионами дейтерия (рис. 10). Получаемые при этом нейтроны имеют энергию 14МэВ (скорость 5,2см/нс); альфа частицы – 3,5МэВ (скорость 1,3см/нс); угол разлета составляет примерно 180° . Зная место и время рождения нейтрона, альфа-частицы и направление движения α -частицы становится точно известна траектория движения 14МэВ-ного нейтрона

Технология ММН позволяет получать объемное 3D изображение исследуемого объекта и определить химический состав каждого элемента его объема. Для этого необходимо использовать многопиксельный альфа-детектор. В этом случае каждому пикселю соответствует определенная область исследуемого пространства, а измерение времени пролета меченого нейтрона дает третью координату для построения объемного изображения

Нами предложена структура многопиксельного альфа-детектора, которая представляет собой матрицу отдельных независимых детектирующих и усилительных элементов (пиксел), выполненных в одном кристалле. Наличие усилителя в пикселе позволяет развязать пикселы друг от друга при съеме информации и за счет этого сохранить быстродействие каждого детектирующего элемента. Для съема информации могут быть использованы либо параллельный (матричный), либо последовательный (временной) способы, либо их комбинация. Модифицированный вариант параллельного способа съема информации использован нами в многопиксельном альфа-детекторе на основе многоканального ФЭУ.

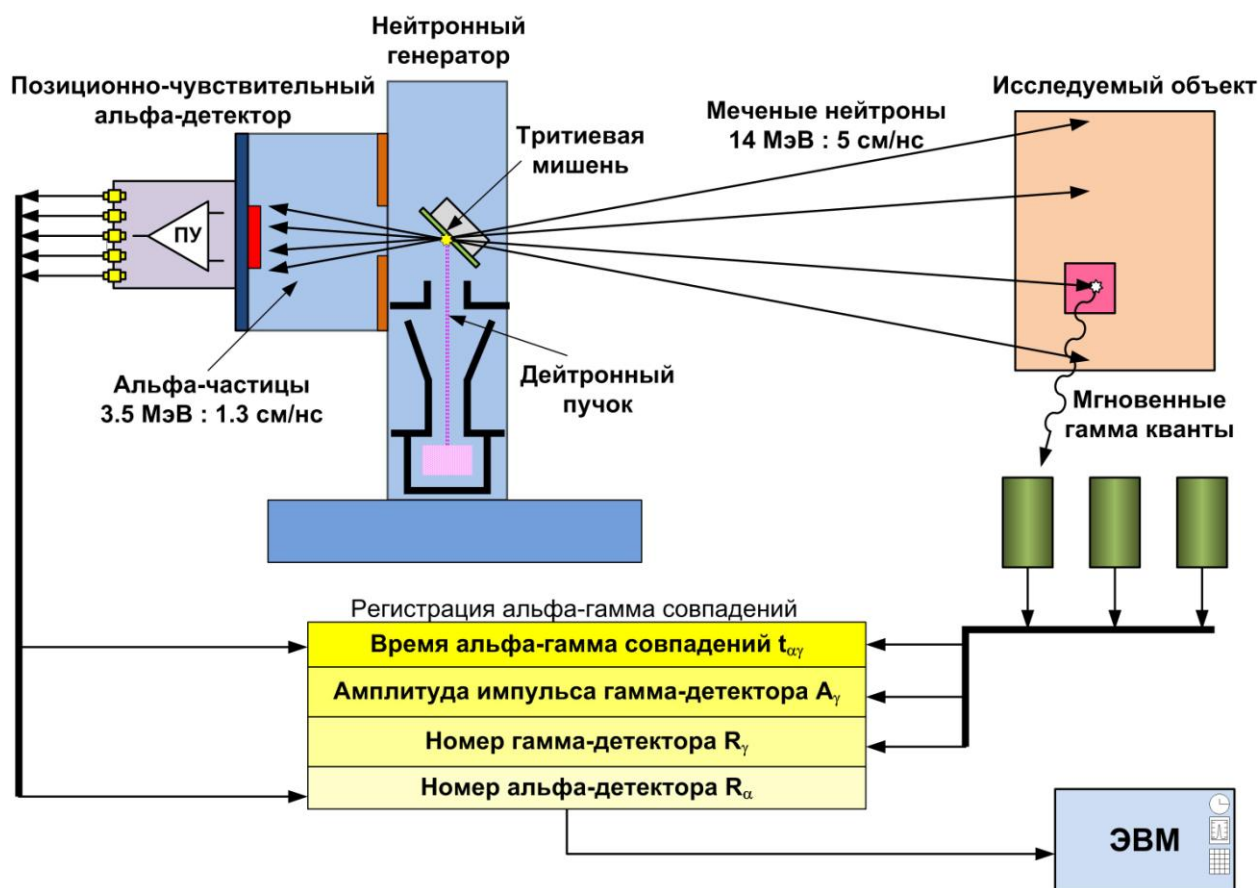


Рис.10. Метод меченых нейтронов

В РНЦ КИ разработана новая модификация метода *упругого* рассеяния быстрых нейтронов. Она основана на использовании спектрометра двойного рассеяния для каждого нейтрона, испущенного из мишени. Реализация методики опирается на создание высокоэффективных позиционно-чувствительных детекторов нейтронов и α -частиц. Для α -частиц таким детектором может быть матрица биполярных транзисторов, соединенных в единую функциональную структуру, а для нейтронов - пакет полимерных оптических волокон диаметром 0,1 - 2,0 мм. Разработана электронная система многопараметрического спектрометра быстрых нейтронов, которая включает блоки кодирования координат нейтронов и α -частиц, блоки измерения времен пролета нейтронов с субнаносекундным разрешением, формирователи с точной временной привязкой, логику отбора полезных событий, быстрые усилители, линии задержки, а также компьютер.

При зондировании объекта исследования нейтронами в результате реакций радиационного захвата или *неупругого* рассеяния нейтронов возникает гамма-излучение дискретной энергии, которое может быть зарегистрировано одним или несколькими гамма-детекторами. Спектральный состав гамма-излучения дает информацию о наличии в объекте водорода, азота, кислорода и углерода, входящих в состав органических веществ.

Одна из основных проблем использования нейтронных методов состоит в высоком уровне фоновой загрузки гамма-детектора при регистрации информационного излучения. За счет пространственной и временной селекции событий можно существенно снизить уровень регистрируемого фонового излучения. Для этого информация о событии обрабатывается и записывается лишь при одновременной регистрации альфа-частицы и гамма-кванта в узком временном окне, соответствующем времени пролета нейтроном исследуемого объекта. Код события содержит данные об интервале времени $t_{\alpha\gamma}$ между срабатыванием альфа- и гамма-детекторов при их совпадениях в заданном окне, координате пиксела альфа-детектора, номере (координате) гамма-детектора и амплитуде импульса с гамма-детектора. Совокупность событий позволяет при использовании соответствующих алгоритмов обработки информации определить объемное распределение химических элементов в объекте исследования.

В настоящее время используется два подхода к решению проблемы обработки информации от устройств на основе ММН: 1) предварительная селекция импульсов аппаратными средствами в режиме on-line и передача в ЭВМ только полезных событий; 2) полная оцифровка сигналов со всех детекторов и передача полного потока данных в компьютер для последующей обработки. В наших работах использовался первый подход, основанный на отборе полезных событий по заданным критериям и накоплении данных блоком буферной памяти с последующей передачей массивов данных в удаленный компьютер для обработки и визуализации. Основным критерием отбора является наличие сигналов от альфа- и гамма- детекторов в заданном временном и амплитудном диапазоне при отсутствии наложенных событий. Такой подход позволяет значительно повысить скорость обработки данных, упростить интерфейс передачи и требования к ЭВМ, а также снизить энергопотребление. В процессе реализации алгоритма электронной обработки сигналов ММН нами было пройдено несколько этапов. Первоначально был создан одноканальный вариант аппаратуры на основе системы наносекундных модулей КАМАК. Он использовался в основном для проверки параметров детекторов вторичных излучений ММН и тестирования нейтронных генераторов в ФГУП ВНИИА им. Духова.

В основу структуры многодетекторной аппаратуры положен модульный принцип, когда каждому гамма-детектору соответствует свой индивидуальный набор функциональных узлов: ФСП, формирующий усилитель и АЦП. В дальнейшем в связи со сравнительно небольшим числом полезных событий эта структура была оптимизирована за счет использования одного объединенного АЦП и формирующего усилителя для нескольких гамма-детекторов.

Данные принципы были заложены в специализированной аппаратуре, разработанной при непосредственном участии диссертанта, для экспериментов по обнаружению опасных веществ методом меченых нейтронов. В диссертации представлена обобщенная схема этой аппаратуры.

В настоящее время разработано несколько вариантов такой аппаратуры, отличающихся конструктивными размерами и интерфейсом связи с ПК, а также количеством каналов для регистрации сигналов от альфа- и гамма- детекторов. В рассмотренной схеме предусмотрена возможность наращивания числа подключенных гамма-детекторов путем установки дополнительных модулей гамма-каналов.

Практическая реализация рассмотренной структуры направлена в первую очередь на преодоление трудностей, связанных с необходимостью получения высокого временного и амплитудного разрешения в условиях повышенных нагрузок, как в альфа-, так и гамма-трактах. Кроме того, существенным фактором являются электромагнитные наводки в альфа-трактах от нейтронного генератора. Для ослабления их влияния в системе были использованы выносные предусилители, расположенные в непосредственной близости к выводам пикселей альфа-детектора.

Необходимое временное разрешение обеспечивается применением формирователей со следящим порогом на входе каждого альфа- и гамма- каналов, быстродействующих схем селекции гамма-сигналов и прецизионного время-амплитудного преобразователя ВАП, используемого для измерения времени между T_α и T_γ . Поскольку сигнал с альфа детектора T_α опережает по времени соответствующий сигнал с гамма- детектора, он подается на стоповый вход ВАП через линию задержки. Время задержки позволяет осуществить режим обращенного времени, при котором запуск ВАП производится только полезными событиями. С выхода ВАП временная информация поступает на амплитудно-цифровой преобразователь АЦП1, используемого в аппаратуре микроконтроллера МК. На второй преобразователь МК - АЦП2 - поступает амплитудная информация с формирующего усилителя гамма-каналов.

Запуск обоих АЦП производится срезом выходного импульса схем альфа-гамма совпадений. Этим же сигналом в МК переносятся адреса пикселя альфа детектора (с AP_α) и номера сработавшего гамма детектора (с AP_γ). Полная информация о событии (коды адресов, времени и амплитуд) передается в ЭВМ для обработки.

Типовое значение разрядности оцифровки амплитуды сигнала в гамма-канале равно 10бит; максимальная амплитуда импульса около 1В. Типовое значение разрядности оцифровки времени альфа-гамма совпадений - 8бит. Это соответствует ширине временного канала 0.16нс при величине временного окна 40нс.

Разработанное специализированное программное обеспечение MAVRControl и HVControl обеспечивают: регулировку порога гамма-каналов; установку режима работы МАВР (совпадения и без совпадений); сбор информации и передачу данных в ПК; визуализацию амплитудного спектра гамма-каналов и временного спектра альфа-гамма совпадений для различных сочетаний альфа- и гамма-каналов; обработку спектров и др.

Испытания многоканального амплитудно-временного регистратора показали что аппаратное временное разрешение при изменении амплитуды импульсов на входе альфа- и гамма-каналов от 50 до 1000 мВ не превышало 0.3 нс. Интегральная нелинейность амплитудной шкалы от 50 до 1000 канала гамма-тракта составила <1 %, интегральная нелинейность временной шкалы от 10 до 240 канала – <1 %.

Испытания на стенде с нейтронным генератором показали, что при облучении графита и использовании в гамма-детекторе сцинтиллятора LYSO для линии 4.4МэВ временное разрешение (FWHM) составляет 1.0-1.2нс, амплитудное разрешение (FWHM) – 3.6-3.8%.

С учетом измеренного временного разрешения (~ 1 нс), определяющего позиционное разрешение вдоль оси пучка, и распределения нейтронов в пучке можно оценить размеры вокселя, характеризующего точность объемного позиционирования ММН, в рассматриваемом случае это $\sim 5 \cdot 5 \cdot 6$ см³.

Рассматривая в целом **методы и средства контроля метрологических характеристик** созданных ИИС, следует отметить, что несмотря на различие решаемых экспериментальных задач в структуре ИИС можно выделить типовые с точки зрения метрологии функциональные устройства. К ним следует отнести устройства временной и пространственной селекции, временной и амплитудный измерительные тракты, а так же устройства оперативного контроля на основе импульсных источников света.

В *устройствах временной селекции* измерялась погрешность временной привязки к входному импульсу в заданном динамическом диапазоне. Для этого использовался генератор с регулируемой длительностью фронта и среза (Г5-59) и аттенюатор(Д2-18), изменение коэффициента затухания в котором не приводит к изменению времени прохождения сигнала, а так же измеритель временных интервалов с пикосекундным разрешением. Таким способом была измерена погрешность привязки ФСП в заданном диапазоне изменения амплитуд. Аналогичным способом определялись характеристики устройств селекции по времени нарастания и длительности импульса. Для измерения разрешающего времени схем совпадений были использованы калиброванные линии переменной задержки, типовая погрешность которых составляет доли наносекунд. Оценка

погрешности схемы компенсации геометрии (рис.3) проводилась с помощью специально разработанной дифференциальной линии задержки.

Временные анализаторы, используемые в созданных ИИС, работают в диапазонах от 5нс (эксперимент ALICE) до 250нс (μ SR-эксперимент). Поскольку в этих анализаторах используются аналоговые преобразователи интервалов (время-время и время-амплитуда), основная погрешность измерений определяется погрешностью калибровки. Для оперативной калибровки временной шкалы анализаторов, а так же для измерения их интегральной и дифференциальной нелинейностей было разработано специальное устройство, позволяющее получать линейчатый спектр, расстояние между линиями которого с большой точностью соответствует шагу градуировки. Минимальный шаг градуировки составлял 20нс, а его погрешность определялась параметрами кварцевого генератора (50МГц). В режиме измерения дифференциальной нелинейности на выходах устройства вырабатываются некоррелированные во времени импульсы, что позволяет получить спектр равновероятных интервалов. Для задания контрольных интервалов порядка долей и единиц наносекунд использовались калиброванные измерительные линии, в том числе с воздушным диэлектриком. Эти линии позволяют воспроизводить интервалы с погрешностью 2-3пс.

Проверка измерительных характеристик *амплитудных спектрометрических трактов* производилась в два этапа. На первом этапе использовались генераторы импульсов точной амплитуды (ГИТА). С помощью этих генераторов определялись динамический диапазон, интегральная линейность и усредненная ширина канала. ГИТА, разработанные в ИАЭ им. Курчатова, позволили определять характеристики амплитудных трактов с погрешностью 0,2%. Дифференциальная линейность определялась с помощью генератора импульсов с линейно нарастающей амплитудой (БГИ-А1). Нелинейность измерения составляла $\leq 0,3\%$. На втором этапе контроль проводился с помощью образцовых источников ионизирующих излучений. Использовался набор ОСГИ с энергиями гамма-квантов от 0,0596МэВ (^{241}Am) до 2,738МэВ (^{88}Y). После измерения суммарного спектра выбранных для калибровки анализатора изотопов определялось положение характерных пиков на оси каналов и оценивалась характеристика линейности спектрометрического тракта. Погрешность при измерении характеристик тракта таким способом $0,3 \div 0,5\%$.

Для измерения основных характеристики *пространственной селекции* использовались контролируемое перемещение детекторов излучений вдоль и поперек

пучка, а также измерение расстояний между макетами мишеней. Пространственное разрешение вдоль пучка определялось временным разрешением детекторов и составило $\pm 2,5$ см в детекторе T0 (эксперимент ALICE) и ± 3 см в экспериментах с мечеными нейтронами.

Для *оперативной проверки градуировки и стабилизации* ИИС с детекторами на основе ФЭУ использовались источники световых импульсов. Первоначально в качестве таких источников применялись карбидокремниевые светодиоды, включенные в пробойном режиме. На основе лавинных транзисторов были разработаны генераторы электрических импульсов с длительностью фронта $\sim 1 \div 2$ нс для синхронного возбуждения светодиодов. В дальнейшем были использованы лазерные диоды. Сравнительно высокая интенсивность излучения и удобство сочленения инжекционных лазеров с оптоволоком позволили создавать многоканальные калибровочные устройства для сложных экспериментальных установок на основе чисто оптического размножения сигналов одного лазера. В детекторе T0 эксперимента ALICE для лазерной калибровки 24 черенковских детекторов используется пикосекундный инжекционный лазер PPL040G (с длиной волны 408 нм). Выходной импульс этого лазера подается на цифровой оптический аттенуатор ДА-100-39-830-9 и далее разделяется на два плеча в каждом из которых используется оптический разветвитель 1:16. В процессе разветвления интенсивность света падает в 220 раз, однако остается достаточной для тестирования быстрых ФЭУ черенковских детекторов. В погружных детекторах гамма-излучения для стабилизации амплитудных трактов использовались диоды, включенные в прямом направлении. Импульсы для возбуждения таких диодов формировались генератором стабильной амплитуды и длительности.

Заключение

Разработка и применение новых средств временной и пространственной селекции позволила не только повысить информативность получаемой в исследованиях информации, но и обеспечила в ряде случаев принципиальную возможность проведения исследований и экспериментов. Перспективность этих разработок была показана еще в процессе создания измерительной аппаратуры для исследования свойств конденсированных сред μ SR-методом. Развитие методики временной селекции позволило создать новые виды селекции импульсов по длительности и форме, а также разработать методологию пространственной селекции, позволяющей определять координаты ядерных событий вне детекторов излучений. В целом разработки в этой области легли в основу создания измерительных комплексов для ряда важных фундаментальных и прикладных

исследований, таких, например, как локализация точек столкновения адронов в эксперименте ALICE, обнаружение и локализация взрывчатых веществ в маскирующих средах и ряда других.

Основные научные результаты работы

1. Проведен анализ требований к измерительным комплексам для исследований свойств вещества и параметров окружающей среды в плане повышения информативности результатов исследований на основе применения методологии временных измерений и селекции импульсных потоков случайных сигналов.
2. На основе применения способов временной селекции разработана методика построения электронной аппаратуры, предназначенной для работы с детекторами, в которых используются протяженные пластмассовые сцинтилляторы. Теоретически и экспериментально показана возможность снижения эффективного уровня шумов (до 50 – 100 кэВ) при использовании таких детекторов в амплитудной спектрометрии. Предложена и реализована методика, позволяющая существенно снизить (до 320 пс) влияние размеров сцинтилляторов на временное разрешение временных спектрометров с протяженными сцинтилляторами
3. Предложены и реализованы методы снижения (до 1-2%) дифференциальной нелинейности преобразования во временных кодировщиках наносекундного диапазона
4. Разработана методика селекции по форме импульсов с изменяющейся амплитудой, основанная на непосредственном измерении времени нарастания импульса, или его длительности на заданных уровнях. Эта методика позволила работать практически со всеми типами детекторов излучений, а также создать оригинальное устройство для определения длительности импульсов с пологими фронтами, амплитуда которых изменяется в широком динамическом диапазоне на определенном относительном уровне.
5. Предложен метод многоканальной передачи спектрометрической информации по одной линии связи на основе кодирования параметрами формы импульсов каждого канала и декодирования сигналов методом временной селекции по форме. Показано, что в широком динамическом диапазоне амплитуд искажения восстанавливаемых спектров от датчиков из-за наложений сигналов на линии связи в такой системе в несколько раз меньше, чем при цифровом методе кодирования номера детектора.
6. Предложены и реализованы методы определения координат и пространственной селекции ядерных событий, происходящих вне детекторов излучений. Методы основаны на использовании временных измерений и селекции, а также позиционно-

чувствительных детекторов (ПЧД). Предложен и запатентован новый метод регистрации сопутствующих альфа-частиц при работе с мечеными нейтронами. Разработана и реализована матричная структура параллельного съема информации с ПЧД на основе многосекционного ФЭУ..

7. Предложен и запатентован способ обнаружения и быстрого определения координат органических веществ с использованием импульсных потоков нейтронов. Рассмотрены варианты алгоритмов работы и структур регистрирующей аппаратуры для обеспечения методики объемного определения координат как упругого, так и неупругого рассеяния меченых нейтронов на опасных объектах в маскирующих средах.

Основные практические результаты работы

1. Разработаны технические средства временной селекции и селекции по форме сигналов, поступающих от детекторов излучений. На базе этих разработок в рамках системы блоков универсального назначения созданы наносекундные модули повышенного быстродействия с широкими функциональными возможностями. Эти модули использованы в целом ряде физических экспериментов.
2. Рассмотрены проблемы и создан новый вариант автоматизированного измерительного мюонного комплекса, с помощью которого на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ, проведен целый ряд исследований свойств вещества μ SR-методом и измерена частота сверхтонкого расщепления мюония в кварце с погрешностью 0,18%, что на порядок меньше ранее измеренного значения.
3. Для изучения гамма-поля водной среды создан измерительный комплекс на основе нескольких погружных детекторов излучения с большими пластмассовыми сцинтилляторами. В нем использован метод снижения эффективного уровня шумов и метод многоканальной передачи спектрометрической информации по одной линии связи. Комплекс испытан в измерениях неоднородностей гамма-поля морской воды в районе Японского моря.
4. Для эксперимента ALICE на большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРНе разработаны модули триггерной электроники детектора T0, запускающего работу всей системы ALICE, когда столкновение ускоренных ионов произошло в заданной зоне. После детального тестирования модули используются в составе аппаратуры детектора T0 в эксперименте ALICE на ускорителе LHC.
5. Предложены и исследованы варианты определения координат на плоскости в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). По сравнению со стандартной

структурой, когда каждый сцинтиллятор кольца ПЭТ обслуживается своим ФЭУ, предложенные варианты отличаются пониженным числом фотоприемников.

6. Создано несколько вариантов регистрирующей аппаратуры для технологии неупругого рассеяния меченых нейтронов, когда в исследуемом объекте возникают гамма-кванты, спектр которых характеризует тип вещества объекта. Созданная аппаратура используется в экспериментальных исследованиях технологии меченых нейтронов в НИЦ КИ, ВНИИА им. Духова, ЦНИИХМ (Москва) и в Корейском исследовательском институте атомной энергии (г. Дайджон, Южная Корея). Эксперименты, проведенные в РНЦ КИ, показали, что разработанная для технологии меченых нейтронов аппаратура обеспечивает точное и стабильное измерение времени регистрации событий. В ходе проведенных работ экспериментально и теоретически показано, что применение временной и пространственной селекции в аппаратуре метода меченых нейтронов обеспечивает подавление регистрируемого фона на 2–4 порядка. Существенное повышение отношения эффект/фон при этом, позволяет уменьшить время идентификации и увеличить вероятность обнаружения опасных веществ.

Список основных публикаций по теме диссертации.

1. Мелешко Е.А. Формирователь со следящим порогом, рассчитанный на повышенные загрузки. ПТЭ, 1972, №1, с.112.
2. Мелешко Е.А. Формирователь импульсов с дифференцированием на входе. ПТЭ, 1972, №2, с. 76.
3. Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Климов А.И., Никольский Б.А., Селиванов В.И. Система функциональных блоков быстродействующей электроники и ее применение в экспериментах с положительными мюонами. Препринт ИАЭ – 2320, Москва, 1973.
4. Мелешко Е.А. Аналоговый преобразователь коротких временных интервалов. ПТЭ, 1973, №5, с. 94.
5. Морозов А.Г., Мелешко Е.А. Многофункциональный блок на ИС. Препринт ИАЭ – 2455, Москва, 1974.
6. Мелешко Е.А., Никольский Б.А., Роганов В.С., Селиванов В.И. и др. Явление двухчастотной прецессии спина положительного мю-мезона в атоме мюония в магнитном поле. Диплом на открытие. № 162. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки» №48, 1975
7. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Временной кодировщик наносекундного диапазона с малой дифференциальной нелинейностью. ПТЭ, 1975. №3, с.95-97.

8. Зеленков А.Г., Мелешко Е.А., Софиев Г.Н., Смолин В.А. Результаты измерения радиоактивных продуктов взрывов и космических лучей с помощью радиозондов (весна 1963г.) ИАЭ-2570, Москва, 1975.
9. Климов А.И., Мелешко Е.А. Аналоговый преобразователь коротких временных интервалов на интегральных схемах. ПТЭ. 1976. №3 .с.100 – 102.
10. Мелешко Е.А., Селиванов В.И. Устройство временной привязки к середине временного интервала. А.С. СССР №506118, Кл. Н03К 5/153. Б.И 1976. № 9, с.170.
11. Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Быстрый усилитель с высокой загрузочной способностью. ПТЭ, 1977, №1, с.141.
12. Мелешко Е.А. Интегральные схемы в наносекундной ядерной электронике. 2-е изд. Доп. М., Атомиздат, 1978.
13. Гуревич И.И., Климов А.И., Майоров В.Н., Мелешко Е.А., Никольский Б.А., Селиванов В.И. Точное определение частоты сверхтонкого расщепления мюония в кварце. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, вып. 1, с. 56 – 60.
14. Климов А.И., Мелешко Е.А., Никольский Б.А., Селиванов В.И. Прецизионный спектрометр для экспериментов с мюонами. ПТЭ, №1, 1980, с.5.
15. Климов А.И., Мелешко Е.А., Селиванов В.И. Устройство для временной привязки к середине изменяющегося временного интервала. ПТЭ, 1980, №2, с.135-138.
16. Климов А.И., Мелешко Е.А. Универсальные программируемые модули наносекундного быстрого действия. Сборник трудов второго Всесоюзного симпозиума по модульным информационно–вычислительным системам. М. ИЯИ АН СССР, 1980, с. 48.
17. Мелешко Е.А., Митин А.А. Измерительные генераторы в ядерной электронике. М., Атомиздат, 1981
18. Апалин В.Ф., Бутурлин В.И., Волчков Ю.А., Мелешко Е.А и др. Структура исследовательского комплекса для изучения гамма-поля внешней среды. ВАНТ Сер. Общая и ядерная физика, 1982, вып. 2 (20), с. 72
19. Мелешко Е.А., Олейник С.В., Палкин Ю.Ю. Блок линейного усиления, пропускания и суммирования импульсов для многодетекторных спектрометров. ПТЭ, 1983, №6, с.104
20. Зелепухин М.В., Крупин С.В., Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Чечин А.И., Воронин А.В., Соколов А.Д. Временные и энергетические характеристики сцинтилляционного и полупроводникового блоков детектирования рентгеновского излучения. ПТЭ, 1984, №6, с. 56.

21. Бессонова Н.А., Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов Г.А., Понамарев А.Н. Автоматизированный комплекс для мюонных исследований. Препринт ИАЭ – 4063/15, Москва, 1984.
22. Духанов В.Н., Климов А.И., Мазуров И. Б., Мелешко Е.А. Наносекундная схема совпадений с программируемым разрешающим временем. Препринт ИАЭ 3906/14, М, 1984
23. Бессонова Н.А., Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Наносекундные модули КАМАК. Препринт ИАЭ – 4177/14, Москва, 1985
24. Абрамов А.А., Бутурлин В.И., Мелешко Е.А., Олейник С.В., Полевой Р.М. Система передачи спектрометрической информации для многодетекторных устройств. ИАЭ, Москва, ЦНИИатоминформ, 1986.
25. Мелешко Е.А., Митин А.А., Олейник С.В. Устройство для передачи спектрометрической информации от N детекторов излучения. А.С.СССР № 1122124, Б.И. 1986, № 18, с. 275
26. Мелешко Е.А., Олейник С.В., Дискриминатор импульсов по времени нарастания. ПТЭ, 1986, №2, с.119.
27. Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М., Энергоатомиздат, 1987.
28. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Сотников В.А. Преобразователь время – код. АС СССР №1310770. кл. 3913509 /24-21. БИ, 1987. № 18.
29. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Счетно-импульсный преобразователь время – код с шириной канала 2нс. ПТЭ. 1988, №3, с.89.
30. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г. Преобразователь время-код с усреднением шага квантования. АС №1381707, кл.3941236/24-24. БИ, 1988, № 10.
31. Бессонова Н.А., Мелешко Е.А., Олейник С.В., Палкин Ю.Ю. Быстродействующий аналоговый коммутатор. ПТЭ, 1988, № 1, с. 95
32. Мелешко Е.А., Олейник С.В. Устройство для измерения длительности импульсов. А.С. СССР, № 1368818, БИ, 1988, № 3.
33. Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Олейник С.В., Осташев И.Е., Палкин Ю.Ю., Котов М.А. Шестнадцатиканальная система цифровой регистрации для изучения свойств твердых тел в сильных магнитных полях. Препринт ИАЭ–4807/14, М, ЦНИИатоминформ, 1989.
34. Климов А.И., Мелешко Е.А., Морозов А.Г., Осташев И.Е. Модули КАМАК наносекундного быстродействия Препринт ИАЭ–4858/15, Москва, ЦНИИатоминформ, 1989.

35. Мелешко Е.А., Олейник С.В. Универсальный дискриминатор по форме импульсов детекторов ионизирующих излучений. ВАНТ, сер. Ядерно–физические исследования. М., 1990, вып.5(13), с. 19.
36. Абрамов А.А., Климов А.И., Мелешко Е.А. и др. Позиционно- чувствительный детектор гамма – квантов для позитронного эмиссионного томографа. ПТЭ, № 5, 1990, с.78 – 83.
37. Klimov A.I., Maiorov V.N., Meleshko E.A. et al. Date acquisition and date analysis systems from two-layer PET ring. Proceedings of The eighth symposium on microcomputer and microprocessor applications. Budapest, Hungary, 12-14 october 1994.
38. Климов А.И., Мелешко Е.А., Мостовой В.И., Тарабрин Ю.А., Яковлев Г.В. Детекторы и электроника многопараметрического спектрометра быстрых нейтронов. Труды XIX Международного симпозиума. Варна Болгария, 15 – 21 сентября 1997. Дубна. ОИЯИ 1998, с.20-245.
39. Климов А.И., Мелешко Е.А., Мурашев В.Н., Павлов Д.В., Тарабрин Ю.А., Яковлев Г.В. Перспективы детектирования альфа–частиц биполярными матричными приборами. В тр. 5-ой Международной конференции «Применение полупроводниковых детекторов в ядерно–физических задачах» Рига 18-22мая 1998г.
40. Мелешко Е.А., Мурашев В.Н., Павлов Д.В., Тарабрин Ю.А., Яковлев Г.В. «Координатно-чувствительный детектор». Патент на изобретение №2133524. (приоритет от 29.07.1998г.) Бюллетень «Изобретения (заявки и патенты)» №20 1999г.
41. Мелешко Е.А., Олейник С.В. Транзисторное устройство для запуска мощных тиратронов ПТЭ, 1999, №3, с.90.
42. Козлов К.Н., Мелешко Е.А., Тупикин Н.А. Создание и испытания время измерительного элемента стартового триггера для эксперимента ALICE. Ядерные измерительно-информационные технологии, № 2, 61 (2004)
43. Каретников М.Д., Мелешко Е.А., Яковлев Г.В. Применение аппаратной обработки событий при регистрации альфа–гамма совпадений в методе сопутствующих частиц. Сборник материалов международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», М.: изд. ВНИИА, 2004, с. 263.
44. Klimov A .I ., Козлов К.Н., Meleshko E . A ., Ostachev I .E , Trzaska W. H. Multiplicity Discriminator for TO Detector ALICE Experiments (CERN). Ядерная электроника и компьютеринг, Труды XX Международного симпозиума, Варна, Болгария, 12-18 сентября, 2005, с.165 – 169
45. Bondila M., Grigoriev V.A., Guber F.F., Kaplin V.A., Karakash A.I., Karavichev O.V., Karavicheva T.L., Klimov A.I., Kondratieva N., Kozlov K.N., Kurepin A.V., Loginov V.A.,

- Lyapin V.V., Malkiewicz T., Marin V.V., Maevskaya A.I., Meleshko E.A. et al. ALICE T0 Detector. IEEE Transactions of Nuclear Science, vol. 52, no 5, October, 2005, p. 1705.
46. Каретников М.Д., Климов А.И., Козлов К.Н., Мелешко Е.А., Осташев И.Е., Тупикин Н.А., Яковлев Г.В., Коротков С.А., Хасаев Т.О. Контрольно – измерительный модуль для экспериментов с мечеными нейтронами. ПТЭ, 2006, № 5, с. 1-7.
47. Bakalyarov A.M., Karetnikov M.D., Kozlov K.N., Lebedev V.I., Meleshko E.A., Obinyakov B.A., Tupikin N. A., Yakovlev G.V. Experimental model of device for detection of nuclear cycle materials by photoneutron thechnology: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 261 (2007) 360-364
48. Karetnikov V., Klimov A., Korotkov S., Meleshko E., Ostashev I., Khasaev T., Yakovlev G. Efficiency of background suppression by tagged neutron technology. NIM B 261, 2007. с.307
49. Мелешко Е.А. Быстродействующая импульсная электроника. М., Физматлит, 2007
50. Apalin V. F., Kozlov K. N., Meleshko E. A., Yakovlev G. V. Digital spectrometer for sandwich type scintillator. XXI Международный симпозиум по ядерной электронике и компьютерингу (NEC2007). (Варна, Болгария, 10-17сентября 2007г.): труды симпозиума. – Дубна: ОИЯИ, 2008 с.76-81.
51. Балыгин К.А., Каретников М. Д., Мелешко Е.А., Яковлев Г. В. Уменьшение мертвого времени пропорциональных счетчиков нейтронов после воздействия потоков ионизирующего излучения. ПТЭ, 2008, №3, с.1.
52. Климов А.И., Козлов К.Н., Мелешко Е.А и др. Быстродействующая электроника детектора T0 для эксперимента ALICE (CERN), Ядерная Физика, 2009, том 72, №2, с. 314-320
53. Балыгин К.А., Каретников М.Д., Климов А.И., Козлов К.Н., Мелешко Е.А., Осташев И.Е., Яковлев Г. В. Исследование характеристик детектирующей аппаратуры для наносекундного метода меченых нейтронов. ПТЭ, 2009, №2, с.1.
54. Balygin K.A., Bolotsky V.P., Karetnikov M.D., Klimov A.I., Kozlov K.N., Meleshko E.A., Shahovskoy V.V. Readout module for multichannel alpha- detector. "Nuclear Electronics & Computing XXII Int.Symposium", Proceedings of the Symposium, E10, 11-2010-22, Dubna, 2010 p. 61.