



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н 62

11-89-730

НИКИТЮК
Николай Михайлович

УДК 681.518.3

МЕТОД СИНДРОМНОГО КОДИРОВАНИЯ
И АППАРАТУРА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ
СОБЫТИЙ И СОПРЯЖЕНИЯ С ЭВМ
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность: 05.13.16 - применение
вычислительной техники,
математического моделирования
и математических методов
для научных исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

В.А. Никитин

Доктор технических наук,
профессор

О.П. Федотов

Доктор технических наук,
профессор

И.В. Штраних

Ведущая научно-исследовательская организация: Институт
физики высоких энергий г. Серпухов.

Автореферат разослан "___" _____ 1990 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1990 г.
в _____ часов на заседании специализированного совета Д047.01.04
при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации по
адресу: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, ЛВТА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь специализированного
совета

Иванченко

З.И. Иванченко

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая диссертация посвящена исследованию метода синдромного кодирования, его математического аппарата и быстрых алгоритмов первичной аппаратной фильтрации физических событий, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц, на основе систематического и последовательного применения алгебраической теории кодирования, вычислительной техники и методики электронных экспериментов физики высоких энергий. Приоритетное кодирование, алгебраическая теория обработки сигналов в годоскопических системах и метод синдромного кодирования реализованы в виде быстрых алгоритмов для регистрации множественности и координат взаимодействий частиц, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц и в виде конкретных разработок мажоритарных схем совпадений на большое число входов, параллельных шифраторов и специализированных процессоров для быстрого отбора событий. Эффективная аппаратная фильтрация событий немислима без программно-управляемых приборов и средств сопряжения спектрометров физики высоких энергий с ЭВМ. Поэтому цикл исследований автора диссертации посвящен разработке и созданию программно-управляемых блоков и систем в стандарте КАМАК.

Актуальность проблемы

Начиная с 1960 г. в физических экспериментах широко используются ЭВМ с целью сбора и обработки экспериментальных данных. Этому способствовало также развитие и совершенствование многоканальных детекторов заряженных частиц. Современные детекторы элементарных частиц физики высоких энергий имеют высокую скорость работы, и ощущается тенденция к увеличению этой скорости. Неуклонно растет число каналов регистрации, что приводит к необходимости в обработке огромного количества сигналов за минимально возможное короткое время. Помимо многопроводных пропорциональных камер (МПК) и дрейфовых камер в современных спектрометрах содержится также много других источников информации: черенковские счетчики, сцинтилляционные годоскопы и др. В результате в процессе регистрации на одно событие получается несколько тысяч многозарядных олов [1].

С ростом энергии частиц все более широкое применение находят calorimeters - детекторы полного поглощения, содержащие десятки тысяч каналов регистрации. Для определения суммарного энерговыделения ливня, образованного высокоэнергетичными частицами, требуется вычисление суммы амплитуд сигналов, получаемых на выходах быстродействующих АЦП. В состав современных и вновь планируемых физических установок высоких и сверхвысоких энергий могут входить также вершинные детекторы. Одной из главных функций триггерных систем таких детекторов является определение за минимально возможное время количества вершин взаимодействия странных частиц. Анализ большого числа работ, описывающих отечественные и зарубежные

триггерные системы первого и второго уровней показывает, что при их построении не учитывается тот факт, что как правило, в современных многоканальных детекторах заряженных частиц одновременно срабатывает небольшая часть (10 - 20%) позиционно-чувствительных датчиков в детекторе. Кроме того, для анализа сигналов на множественность и определения координат событий используется в основном такие алгоритмы, с помощью которых невозможно решить проблему быстрого анализа событий за несколько десятков наносекунд при большом числе каналов регистрации и приемлемой стоимости электроники. Поэтому исследование и разработка эффективных систем аппаратной фильтрации полезных событий и программно-управляемой электроники является весьма актуальной задачей.

Цели и задачи исследования.

Основными целями диссертации явились:

- исследование, теоретическое обобщение и создание новых математических быстрых алгоритмов для решения задач создания эффективных устройств регистрации множественности и координат событий в многоканальных детекторах заряженных частиц.
- выработка общих принципов построения быстродействующих устройств для отбора физических событий по множественности сигналов, зарегистрированных в годоскопической плоскости на основе метода синдромного кодирования и методов параллельной компрессии данных.
- исследование и создание экономичных методов и устройств приоритетного кодирования параллельно-последовательного типа.
- конструирование новых типов кодов для построения экономичных годоскопических систем со световой кодировкой, решающих задачу оптимального кодирования множественности сигналов и координат событий.
- разработка новых и быстродействующих алгоритмов на основе алгебраической теории кодирования и алгебраических методов обработки сигналов.
- развитие новых, быстрых и экономичных алгоритмов, реализующих предложенный метод синдромного кодирования для создания быстродействующих мажоритарных схем совпадений и координатных процессоров.
- разработка принципиально новых устройств для регистрации событий с кластерами.
- унификация электронной аппаратуры для спектрометров физики высоких энергий, работающих на линии с ЭВМ.
- разработка методов расчета параллельных шифраторов и специализированных процессоров на основе аналитических выкладок и аналитических расчетов на ЭВМ.
- аналитические расчеты полей Галуа $GF(2^m)$, кодирующих матриц, определителей матриц, схем умножения в поле Галуа и проч.

Разработанный на базе алгебраической теории кодирования и алгебраических методов обработки сигналов математический аппарат и быстрые алгоритмы для оптимального кодирования данных в годоскопических системах требовалось применить для создания быстродействующих устройств отбора полезных событий в современных спектрометрах физики высоких энергий с учетом тенденций в построении многоуровневых систем фильтрации событий на линии с ЭВМ.

Научная новизна и значимость работы

Развитие и использование многоканальных детекторов заряженных частиц, усложнение критериев отбора физических событий и стремление физиков-экспериментаторов повышать эффективность и скорость отбора нужных физических событий привело к необходимости исследования и разработке новых принципов регистрации, фильтрации и обработки данных в спектрометрах физики высоких энергий. Стало очевидным, что интуитивный подход к проектированию устройств фильтрации искомым событиям не может обеспечить получение высоких параметров и прежде всего таких, как быстродействие, коэффициент отбора полезных событий и экономичность.

Исследование и разработка новых алгоритмов и методов построения устройств компрессии данных и специализированных процессоров могли быть выполнены на стыке математических методов обработки сигналов, алгебраической теории кодирования и вычислительной техники. Другими словами, было необходимо с учетом бурного развития методики физики высоких энергий, техники больших интегральных микросхем и микропроцессоров найти адекватный метод построения быстродействующих логических устройств отбора полезных событий и специализированных процессоров. Рост сложности интегральных микросхем и существенное расширение их функциональных возможностей не решают проблемы в связи с усложнением критериев отбора физических событий и ростом числа каналов регистрации в спектрометрах до 10^5 и больше. Требовались новые идеи, и как это показано в диссертации автора, они базируются на методах абстрактной алгебры, таких как группы, конечные поля, кольца и быстрые алгоритмы, например, система остаточных классов и параллельная компрессия данных. Предлагаемая автором методология основана на широком и систематическом применении метода синдромного кодирования, который для решения поставленных целей в явном виде не применялся. Метод синдромного кодирования предполагает использование эффективного математического аппарата алгебраической теории кодирования и техники кодирующих и декодирующих устройств. Результатом исследований в этом направлении явилось установление того факта, что проблема декодирования кодов, исправляющих t ошибок ($t > 1$) и эффективная регистрация t сигналов, возникающих в годоскопической плоскости - это фактически одна и

таже задача. Разработанный метод синдромного кодирования основан на системе аналогий, которая как оказалось, существует между алгебраической теорией кодирования и созданной автором алгебраической теорией го-доскопических систем. Например, проблема регистрации и обработки событий с кластерами, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц, сводится к теоретической и практической задаче обнаружения и исправления пакетов ошибок, возникающих в каналах передачи информации. С теоретической точки зрения, благодаря такому подходу, удалось объединить и рассмотреть с единых позиций такие важные направления, как цифровая обработка сигналов, задачи которой формулируются в системах действительных и комплексных чисел и задачи кодирования с коррекцией ошибок, которые формулируются в другой числовой системе, называемой полем Галуа $GF(2^m)$. В результате появилась возможность использования теории и практики кодов, исправляющих ошибки, для построения параллельных шифраторов комбинационного типа, с помощью которых одновременно кодируется $t > 1$ событий без применения тактовых импульсов и элементов памяти, мажоритарных схем совпадений, параллельных счетчиков и координатных специализированных процессоров, не имеющих аналогов в мировой практике по таким параметрам, как быстродействие, широкие функциональные возможности и экономичность.

Новизна технических решений, созданных на основе метода синдромного кодирования и других методов подтверждается тем, что они опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных изданиях и защищены 30 авторскими свидетельствами на изобретения и среди них семь изобретений внедрены. Кроме того, появилась возможность создавать новые коды и на их основе кодирующие устройства с наперед заданными полезными свойствами.

Результатом таких внедрений является повышение коэффициента отбора полезных событий, увеличение скорости набора статистики и расширение функциональных возможностей спектрометров. Следует отметить, что метод синдромного кодирования используется как в отечественных, так и в зарубежных физических центрах. Так, например, в ЦЕРНе со ссылкой на нашу основополагающую работу, где предложен алгоритм отбора событий по схеме: код Хемминга - ИЛИ для эксперимента NA28, разработан быстродействующий трековый процессор [2]. По методу синдромного кодирования разработан и применен в спектрометре БИС-2 специализированный трековый процессор, в котором используется кодирующая матрица, предложенная в ряде работ автора.

В начале 50-х годов, когда начали появляться логические схемы на электронных лампах, разработчики аппаратуры и физики-экспериментаторы изучали и осваивали булеву алгебру, на основе которой создавались такие блоки электроники, как совпадения, антисовпадения, смесители и проч. Однако, в связи с развитием многоканальных систем регистрации и обработ-

ки данных, в которых широко используется техника больших интегральных микросхем и микропроцессоров, появилась необходимость в развитии и использовании нового математического аппарата - алгебры Галуа, которая является естественным продолжением булевой алгебры на случай большого числа переменных и K -значной логики, где $K > 2$.

Исследования показали, что синтез довольно сложных булевых функций можно выполнять на базе аналитических расчетов на ЭВМ. Эффективность такого метода показана на примере решения такой важной проблемы в ядерной электронике, как создание динамически программируемых универсальных модулей. Причем, в этой области не было готовых методов и решений из-за отсутствия четкой постановки задачи и конструктивного подхода к решению проблемы. Поэтому для решения отмеченных выше задач по инициативе автора было организовано научное сотрудничество, результатом которого явилось создание комплекса программ для автоматизации логического проектирования устройств компрессии и обработки физической информации, разрабатываемых на базе алгебраической теории кодирования и алгебраических методов обработки сигналов. Созданный теоретический аппарат и его математическое обеспечение позволили автору диссертации создать новые быстродействующие алгоритмы для выполнения алгебраических операций в поле Галуа, рассчитать таблицы для решения задач проектирования специализированных процессоров для быстрого отбора событий.

В диссертации дан эффективный метод решения проблемы создания универсального динамически программируемого быстродействующего модуля (УДПМ), имеющего алгебраическую структуру. Показано, что для практической реализации быстродействующих УДПМ можно использовать модули ПЗУ, ПЛМ и другие большие интегральные микросхемы. Использование набора таких однотипных модулей в перспективе открывает возможность для быстрого перепрограммирования с помощью микро-ЭВМ триггерных устройств первого уровня без изменения внешних связей, которые в настоящее время выполняются механическим путем. Один из вариантов УДПМ защищен авторским свидетельством на изобретение.

Перспективность и большую практическую ценность алгебраических методов обработки сигналов можно проиллюстрировать на примере развития такого важного направления в современном приборостроении, как сигнатурный анализ, который базируется на свойстве избыточных кодовых последовательностей исправлять ошибочные символы, возникающие в цифровых системах в процессе передачи и приема такой последовательности. Создаваемые на этой основе приборы - сигнатурные анализаторы используются для тестирования микропроцессоров и сложной аппаратуры со встроенными БИС и микропроцессорами. Однако, в известных сигнатурных анализаторах

используются в основном последовательные методы обработки данных. Разработанные автором, диссертации параллельные алгоритмы для выполнения трудоемких операций в поле Галуа могут найти применение и в этой области приборостроения. Наряду с исследовательской и научной деятельностью, автором диссертации проводилась большая работа по созданию и внедрению в физические эксперименты программно-управляемых блоков в стандарте КАМАК. В частности, внесен творческий вклад в создание систем регистрации на уровне горизонтальной, вертикальной и последовательной системы КАМАК. Ряд приборов внедрен в опытное производство ОИЯИ. Несмотря на то, что система КАМАК представляет собой международный стандарт, в котором строго определены три уровня стандартизации: механический, электрический и логический, для разработки и внедрения в физические эксперименты столь сложной аппаратуры требовалось проведение комплекса схематических, технологических и организационных мероприятий для ее успешного внедрения.

Разработанный математический аппарат метода синдромного кодирования и методика исследований, предложенные в настоящей диссертации, позволили создать и внедрить ряд параллельных шифраторов со специфическими свойствами, мажоритарных схем совпадений, параллельных счетчиков для быстрого отбора событий и специализированный процессор с широкими функциональными возможностями и входящими в спектрометры физики высоких энергий и в систему автоматизации и настройки каналов пучков на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Ряд программно-управляемых приборов в стандарте КАМАК, разработанных автором и при его участии, внедрены в опытное производство для мелкосерийного производства. Эта работа началась еще в 1972 г. и продолжается по настоящее время с учетом новых требований методики физических экспериментов. Автор принимал также творческое участие в создании ряда спектрометров, работающих на линии с ЭВМ, на которых получены результаты в таком важном направлении, как релятивистская ядерная физика. Основные положения диссертации опубликованы также в двух циклах лекций для молодых ученых ОИЯИ, а также в двух монографиях, изданных массовым тиражом. Некоторые схемные решения автора, такие как приоритетные шифраторы, получившие широкое применение в системах регистрации спектрометров физики высоких энергий, оказались весьма плодотворными и не менее чем на три года опередили аналогичные разработки за рубежом.

Следует отметить, что ряд ведущих ученых ОИЯИ, оценили совокупность работ автора, представленных в диссертации, как перспективное направление в разработке и применению метода синдромного кодирования для быстрой аппаратной фильтрации событий, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц.

Следующие основные результаты диссертации выдвигаются для защиты:

1. Метод синдромного кодирования, его теоретическое обоснование и применение для оптимального кодирования данных в годоскопических системах, создание устройств сжатия, фильтрации и обработки физических событий в спектрометрах физики высоких энергий.
2. Разработка новых кодов и кодирующих схем для регистрации событий с кластерами.
3. Разработанный математический аппарат метода синдромного кодирования для синтеза и построения параллельных шифраторов комбинационного типа на t входных сигналах ($t > 1$), для создания устройств отбора событий по множественности сигналов с алгебраической структурой и специализированных координатных процессоров, оперирующих над элементами поля Галуа $GF(2^m)$.
4. Применение разработанного математического аппарата для создания и внедрения новых, эффективных методов и приборов, не имеющих аналогов в мировой практике, для спектрометров физики высоких энергий, что подтверждается актами о внедрении.
5. Конструирование новых типов суперпозиционных кодов и соответственно кодирующих схем и их применение для построения параллельных шифраторов на большое число входов и предложение для применения таких кодов в параллельных шифраторах для сцинтилляционных годоскопов со световой кодировкой.
6. Разработанные быстрые алгоритмы и защищенные авторскими свидетельствами на изобретения устройства для выполнения операций над элементами поля Галуа $GF(2^m)$.
7. Развитие математического аппарата синтеза переключательных функций, представляемых элементами поля Галуа $GF(2^m)$, с помощью аналитических выкладок и расчетов на ЭВМ.
8. Оригинальное решение проблемы создания универсального, динамически программируемого логического модуля.
9. Пионерские разработки устройств приоритетного шифрования, используемые в спектрометрах физики высоких энергий и защищенные тремя авторскими свидетельствами на изобретения.
10. Исследование и разработка метода параллельной компрессии данных для калориметров и других многоканальных детекторов заряженных частиц.
11. Методика расчета устройств сжатия и обработки данных, разрабатываемых на основе алгебраической теории кодирования.
12. Пионерские разработки и внедренные в физические эксперименты ряд приборов и контроллеров в стандарте КАМАК.

13. Разработанный впервые в нашей стране комплекс аппаратных средств для последовательной системы КАМАК и его применение для автоматизации системы диагностики пучков на синхрофазотроне ОИЯИ и в спектрометре для исследования взаимодействия релятивистских частиц и ядер с протяженными мишенями.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на международных симпозиумах ОИЯИ по ядерной электронике (Варшава, 1971; Будапешт, 1973; Дубна, 1985 г. г.); на международных совещаниях по системным методам и аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике (Дубна, 1981; 1983 и 1985 г. г.); на всесоюзной конференции по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ (Новосибирск, 1981); на первой объединенной всемирной конференции по символьной алгебре, аналитическим вычислениям и применению корректирующих кодов ISSAC-88 и ААЕСС-6, Рим, июль, 1988; на Европейской конференции по применению корректирующих кодов АЕСС-7, Тулуза, июнь, 1989; на научных семинарах Лаборатории высоких энергий и вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ; на школе ИЯИ для молодых ученых в 1984 и 1986 г. г., в виде лекций для молодых ученых ОИЯИ, а также в *Electronic Newsletter* (CERN).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 65 печатных работ и среди них две монографии, два цикла лекций для молодых ученых ОИЯИ и 15 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, пяти приложений, заключения, списка литературы из 259 наименований, содержит 250 страниц печатного текста, 105 рисунков и 31 таблицу. Обзорная часть диссертации детально изложена в монографиях "Программно-управляемые блоки в стандарте КАМАК", "Микро-процессоры и микро-ЭВМ. Применение в приборостроении и в научных исследованиях [4,5], а также в двух циклах лекций для молодых ученых ОИЯИ: "Электронные методы в экспериментальной физике высоких энергий" и "От современной алгебры - к специализированным процессорам" [6,7].

II. Краткое содержание диссертации

Во введении обсуждается проблематика работы, ее актуальность и новизна, определены цели и задачи исследования, кратко перечислены основные результаты по главам диссертации.

В первой главе рассмотрены основные сведения из алгебраической теории кодирования. На основе системы аналогий установлена прямая связь, которая существует между алгебраической теорией кодирования и методами обработки сигналов в годоскопических системах, что позволило обосновать и предложить метод синдромного кодирования для сжатия информации и обработки сигналов, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц. Изложен эффективный метод анализа параметров и структуры многоканальных годоскопических систем с помощью кодирующих матриц. Приведена одна из центральных теорем избыточного кодирования, с помощью которой можно создавать кодирующие матрицы с наперед заданными свойствами. Приводятся конкретные примеры применения метода синдромного кодирования для построения параллельных шифраторов, с помощью которых можно эффективно кодировать события с кластерами [7-12].

Оптимальное кодирование информации в годоскопических системах предполагает решение следующих проблем.

Сжатие числа каналов регистрации и представление данных в форме, удобной для выполнения алгебраических, арифметических и логических операций. Это, например, - преобразование унитарного позиционного кода в натуральный двоичный или циклический код.

- Применение метода синдромного кодирования с целью компрессии и преобразования данных при условии ограниченной множественности регистрируемых сигналов.

- Применение избыточного кода для повышения пространственного разрешения годоскопических систем.

- Создание новых кодов и соответственно кодирующих устройств для годоскопов с учетом бурного развития электронных методов физики высоких и сверхвысоких энергий.

Проблема оптимального кодирования возникает также в связи с тем, что сигналы, поступающие от детекторов заряженных частиц, имеют различную природу. Например, кодирование данных, поступающих от сцинтилляторов можно выполнить до ФЭУ с помощью гибких световодов. В то же время сигналы, поступающие от проволочек МПК, как правило, нуждаются в усилении и формировании, и только после этого возможно их надежное кодирование, хотя и здесь возможны исключения. Другими словами, требовался поиск и конструирование таких кодов, с помощью которых можно было бы кодировать слабые электрические и световые сигналы.

В настоящее время основными устройствами кодирования данных в годоскопических системах являются приоритетные шифраторы, поскольку такие

устройства являются универсальными в том смысле, что позволяют кодировать сигналы, поступающие от произвольного числа одновременно сработавших датчиков. Однако, эта универсальность достигается за счет увеличения времени преобразования, что является следствием применения элементов памяти и тактирующих импульсов. Поэтому в тех случаях, когда прежде всего требуется высокое быстродействие, применяются параллельные шифраторы, у которых число выходов $N = \log_2 n$, где n – число каналов регистрации. Однако, при $t > 1$ такое устройство неработоспособно. Даже при $t = 1$, когда частица проходит под углом к плоскости годоскопа. Поэтому в таких случаях для регистрации событий с двойными кластерами применяется код Грэя, который также как и натуральный двоичный код оптимален. Большой практический интерес представляют такие кодирующие устройства, с помощью которых можно было бы параллельно зашифровать t одновременно сработавших позиционно-чувствительных датчиков t . У таких шифраторов должно выполняться условие $N = t \log_2 n$.

Суть проблемы заключается в том, что в теории кодирования выделяют три раздела: теория алгебраических кодов, теория сверточных кодов и теория кодов, используемых в арифметических устройствах. Хотя эти разделы тесно связаны друг с другом, но в тоже время они характеризуются собственным подходом к проблеме кодирования. Поэтому в процессе исследования возник вопрос: какой из этих разделов является наиболее подходящим для оптимального кодирования данных в годоскопических системах?

Как показано в диссертации, для этих целей наиболее приемлемой является алгебраическая теория кодирования. И суть дела не только в том, что она базируется на хорошо разработанном математическом аппарате и, в частности, на алгебре конечных полей. Алгебра Галуа, с помощью которой описываются наиболее популярные циклические корректирующие коды, является более общей по сравнению с Булевой алгеброй, что в конечном итоге позволяет рассматривать процесс оптимального кодирования данных и создание логических устройств отбора полезных событий с широкими функциональными возможностями на основе единой теоретической концепции. Кроме того, коды, исправляющие ошибки в арифметических устройствах, эффективны в тех системах, где используются позиционные системы счисления, например, в универсальных ЭВМ.

С целью применения алгебраической теории кодирования для решения ряда задач электронных методов физики высоких энергий автором диссертации разработана система аналогий между основными понятиями и теоремами алгебраической теории кодирования и алгебраическими методами обработки сигналов в годоскопических системах [8,9]. В табл. I приведена такая система аналогий. Рассмотрим комментарии к таблице.

1. Избыточное кодирование используется в технике связи и в вычислительной технике для повышения надежности устройств передачи и обработки ин-

формации. Как показано в диссертации, теория и техника корректирующих кодов может быть успешно использована при создании детекторов и годоскопических систем с целью повышения их пространственного разрешения и различного рода кодирующих устройств, решающих задачу регистрации множественности и координат событий в оптимально кодированном виде.

Таблица I

Алгебраическая теория кодирования	Алгебраическая теория обработки сигналов в годоскопических системах
1. Избыточное кодирование.	Избыточное кодирование с целью повышения пространственного разрешения и увеличения функциональных возможностей годоскопов.
2. Кодовый вектор блокового кода, состоящий из n символов.	Кодовое слово, считываемое от датчиков в виде унитарного позиционного кода.
3. Вектор ошибки e .	Физическое событие, зарегистрированное в многоканальном детекторе.
4. Пакет ошибок, B	Событие с кластером.
5. Корректирующая способность кода, t .	Количество одновременно сработавших датчиков,
6. Число проверочных символов, N	Количество разрядов на выходах кодирующего устройства.
7. Эффективность кода, $V = K/n$	Коэффициент сжатия K_c .
8. Кодирующее устройство.	Шифратор.
9. Проверочная матрица, H^T	Кодирующая матрица, $H_{n,n}$
10. Кодовое расстояние, d .	Кодовое расстояние, d .
11. Вес кодового вектора, w .	Вес строки кодирующей матрицы.
12. Вес столбца проверочной матрицы, w .	Коэффициент разветвления сигнала с датчика, K_p
13. Полностью асимметричный канал.	Канал регистрации данных в годоскопической плоскости.
14. Итеративное кодирование.	Кодирование данных в детекторе, состоящем из нескольких годоскопических плоскостей или применение итеративного кода для сжатия данных.
2. Блоковый код – это код, в котором используется последовательность из	

n символов. Кодовый вектор блокового кода состоит из K информационных и $m = n - K$ избыточных контрольных символов. Нулевому вектору соответствует нулевое слово, считываемое от детектора в том случае, когда нет сработавших датчиков ($n = 2^m - 1$).

3. В процессе передачи данных по каналу к кодовому вектору может добавиться вектор ошибки e . Этому вектору в теории годоскопических систем соответствует физическое событие, в результате которого с датчиков поступают сигналы по каналам регистрации.

4. В теории кодирования существуют специальные коды, исправляющие пакеты ошибок. Поэтому эта теория может быть успешно использована для построения счетчиков и шифраторов кластеров, регистрируемых в годоскопических системах.

5. Параметр t есть то количество искаженных символов, которые могут исправляться корректирующим кодом. В теории годоскопических систем величина t определяет максимальное число сработавших датчиков.

6. Важным параметром избыточного кода является число проверочных символов "синдром". При $t > 1$ число проверочных символов $n = mt$ для оптимального кода.

7. Эффективность кода v определяется из соотношения $V = K/n$. В годоскопических системах этому параметру соответствует коэффициент сжатия K_c , равный n/m . Это один из важнейших параметров кодирующего устройства, в котором используется синдромное кодирование, так как он характеризует степень сжатия данных или эффективность кодирования.

8. Кодирующее устройство служит для формирования контрольных символов на стороне передатчика. В годоскопических системах аналогом кодирующего устройства служит параллельный шифратор или кодирующее устройство последовательного действия.

9. Принципиальная схема кодирующего устройства задается матрицей проверочных соотношений, состоящей из m строк и n столбцов. В соответствии с принятой системой аналогий для построения кодирующих устройств с заданными свойствами можно использовать соответствующие проверочные матрицы, применяемые в практике корректирующих кодов. Такие матрицы мы будем называть еще матрицами связей. Каждому позиционно-чувствительному датчику годоскопической плоскости ставится в соответствие один столбец матрицы связей, а количеству строк соответствует число выходов параллельного шифратора. С целью исключения неопределенностей при определении координат сработавших датчиков, и даже одного из них, все столбцы матрицы связей должны быть различны. Далее, с целью анализа функциональных возможностей параллельного шифратора над столбцами матрицы связей выполняются линейные и нелинейные операции.

10. Зная кодовое расстояние d того или иного кода, можно выбрать или самому составить кодирующую матрицу с нужными свойствами. Поскольку ис-

ходное кодовое слово нами рассматривается как нулевое, то для анализа свойств кодирующей матрицы более удобной, чем понятие кодового расстояния, является одна из центральных теорем избыточного кодирования: линейный (n, k) -код с проверочной матрицей $H = [h_0, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}]$, где h_i - вектор-столбцы размерности $(n - k) \times 1$, $i = 0, 1, \dots, n-1$, имеет минимальное кодовое расстояние d тогда и только тогда, когда любые $d - 1$ столбцов матрицы $H_{n, n}$ линейно независимы. Следует отметить, что между параметрами t и d существует простое, известное соотношение $d = 2t + 1$. Пользуясь данной теоремой, можно применить для расчета кодирующих матриц с заданными свойствами ЭВМ.

11. Вес кодового вектора W определяется, как число ненулевых компонент этого вектора. Количество единиц в строках проверочной матрицы характеризует сложность реализации кодирующих устройств, так как число входов схем, формирующих синдром по строкам, равно числу единиц, содержащихся в соответствующей строке.

12. Вес столбца проверочной матрицы также имеет отношение к сложности реализации кодирующего устройства. Так, вес столбца матрицы связей определяет коэффициент разветвления K_p сигнала. Чем меньше эта величина при прочих равных параметрах, тем проще связи между выходами датчиков сигналов и входами логических элементов, формирующих синдром.

13. Полностью асимметричный канал характеризуется тем, что в нем имеет место один вид ошибок, т. е. возможно либо преобразование нулей в единицы либо, наоборот, только единиц в нули. В этом смысле каналы регистрации данных в годоскопических системах являются чисто асимметричными. Необходимость введения такой аналогии диктуется тем, что для асимметричных каналов имеется ряд кодов с хорошими параметрами и такие коды легко реализуются.

14. При итеративном кодировании n датчиков располагаются в виде квадратной матрицы, содержащей K_1 строк и K_2 столбцов, и вычисляется синдром по строкам и столбцам. В результате число каналов регистрации уменьшается до величины $2n^{1/2}$. Такие коды просто реализуются и поэтому не случайно они получили широкое применение в сцинтилляционных годоскопах для регистрации одночастичных событий. В двумерном итеративном коде общее кодовое расстояние $d = d_1 d_2$, где d_1 и d_2 кодовые расстояния исходных кодов, выбранных для итерации. Важно, что итеративные коды образуют обширный класс кодов, поскольку для итерации можно выбрать любые коды с хорошими исходными параметрами. Кроме того, можно применить s -мерное итеративное кодирование для разрешения неопределенностей при регистрации многочастичных событий.

Были рассмотрены основные аналогии, используя которые можно приме-

нить для решения ряда задач электронных методов физики высоких энергий. Суть метода синдромного кодирования заключается в следующем (рис. 1а).

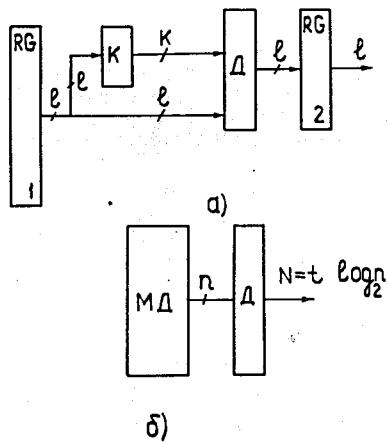


Рис. 1. К пояснению метода синдромного кодирования. К - кодирующее устройство, Д - декодер, МΔ - многоканальный детектор.

Если рассматривать обычную систему связи с применением корректирующего кода, где в процессе передачи к l -разрядному регистру добавляется k -разрядный код синдрома. С помощью этих символов на стороне приемника корректируются в определенных пределах возможные ошибки. Теперь рассмотрим более простую схему передачи, которая имеет место при считывании данных от годоскопической плоскости (рис. 1,б). В отсутствие события считываемое слово равно нулю. Срабатывание определенного количества датчиков рассматривается, как добавление к нулевому слову вектора ошибки e , содержащего t символов. Причем, предполагается, что $t \gg n$. Так, если использовать оптимальный код, исправляющий t ошибок, то на выходе кодирующего устройства длина считываемого слова сжимается до величины $N = t \log_2 n$. Например, если годоскопическая плоскость содержит $n = 1000$ датчиков, то при $t = 3 \quad N = 30$. В силу известного из общей теории кодирования положения значение синдрома N получается в виде двоичного натурального кода только при $t = 1$, т. е. при кодировании по Хеммингу. Существенным в методе синдромного кодирования является тот факт, что синдром N несет в себе данные не только о координатах сработавших датчиков, но и об их количестве.

Практическое использование метода синдромного кодирования рассматривается на примере проверочной матрицы кода Хемминга, исправляющего $t = 1$ ошибку. Для конкретного случая, когда $n = 15$, $k = 11$ и $m = 4$, имеем

$$H_{15,4} = \begin{array}{c|cccccccccccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & \text{Выходы} \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & N1 \downarrow \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & N2 \downarrow \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & N3 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & N4 \end{array}$$

Входы $\rightarrow n_1 \quad n_2 \quad n_3 \quad n_4 \quad n_5 \quad n_6 \quad n_7 \quad n_8 \quad n_9 \quad n_{10} \quad n_{11} \quad n_{12} \quad n_{13} \quad n_{14} \quad n_{15}$

Не вдаваясь в тонкости процесса кодирования и декодирования, которые

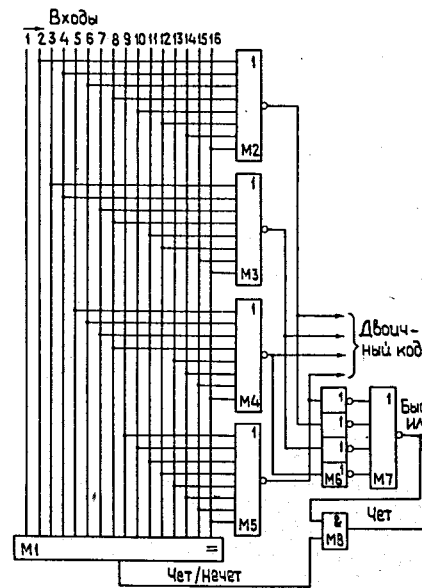


Рис. 2. Схема параллельного шифратора для регистрации двойных кластеров.

достаточно подробно описаны в учебниках, отметим, что характерной особенностью проверочной матрицы обыкновенного кода Хемминга является то, что она описывает принципиальную схему параллельного шифратора, широко применяемого для преобразования унитарного кода в двоичный натуральный код при условии, что на его входах имеется один и только один сигнал. Однако, обыкновенный код Хемминга допускает усовершенствование, направленное на увеличение кодового расстояния до четырех. Добавление одного проверочного символа, осуществляющего проверку на четность, приводит к модифицированному коду Хемминга, который способен обнаруживать двойные ошибки и исправлять ошибки в двух соседних позициях. Так, из кодирующей матрицы $H_{15,4}$ получается следующая матрица для модифицированного (16,11)-кода Хемминга:

$$H_{16,4} = \begin{array}{c|cccccccccccccc|c} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \end{array}$$

На рис. 2. приведена схема параллельного шифратора для регистрации двойных кластеров, которая составлена в соответствии с матрицей $H_{16,4}$. Характерной особенностью кодирующих матриц $H_{n,m}$ является то, что позиции единиц в 1-ом векторе-столбце матриц показывают, в каких проверочных соотношениях участвует 1-й информационный разряд. Далее, позиции единиц в 1-й строке показывают, какие разряды включаются в 1-ю сумму по модулю два, значение которой приписывается 1-му контрольному разряду. В соответствии с этим правилом и составлена схема, приведенная на рис. 2. Причем, в диссертации показано, что код Хемминга и код Грея являются суперпозиционными кодами и поэтому для формирования проверочных соотношений можно вместо сумматоров по модулю два использовать более простые элементы ИЛИ, например, усилители-смесители в том числе и ФЭУ.

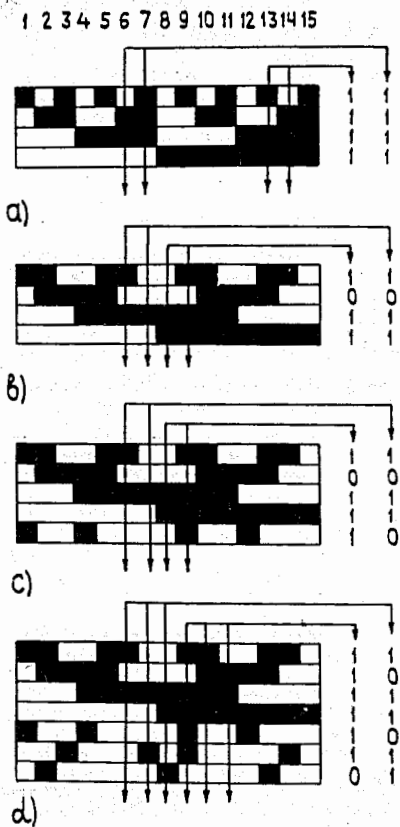


Рис.3. Схемы кодирования сцинтиляционного годоскопа: а) двоичный код, б) код Грэя, с, д) модифицированный код с тремя дополнительными разрядами.

$\log_2 n$. Поскольку модифицированный код Грэя является также суперпозиционным кодом, то вместо световой кодировки можно применить кодирование с помощью обычных усилителей смесителей, что и было сделано при построении шифратора, содержащего 63 входа и 9 выходов [12]. Разработанный шифратор использовался для построения профиля пучка заряженных частиц, регистрируемых с помощью многопроволочной пропорциональной камеры.

Автором показано, что код Грэя имеет тот недостаток, что при сложении по правилам булевой суммы некоторых соседних столбцов кодирующей матрицы получается совпадение кодов. Это приводит к ухудшению пространственного разрешения координат в таких позициях в случае регистрации координат двойных кластеров (рис.3,а). С целью однозначного разрешения координат двойных и тройных кластеров предложена [9,10] кодирующая матрица модифицированного кода Грэя, которая при $n = 15$ имеет вид

$$H_{15,7} = \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} 110011001100110 \\ 01111000111100 \\ 00011111110000 \\ 00000011111111 \\ 100100001001000 \\ 00100010100010 \\ 01000010000100 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Код Грэя} \\ \text{Дополнительные} \\ \text{строки.} \end{array} \end{array}$$

Таким образом, если выполнить световую кодировку в соответствии с данной матрицей, то с помощью такого годоскопа можно регистрировать координаты двойных и тройных кластеров. Причем, коэффициент сжатия растет с увеличением числа разрядов исходного кода Грэя, в то время как количество дополнительных строк остается неизменным. Так, при $m = 4$ $K_C = 15:7$, а при $m = 6$ $K_C = 63:9$ и т. д. При больших числах n K_C стремится к

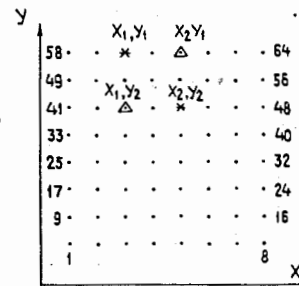


Рис. 4. К вопросу об идентификации "духов" по методу синдромного кодирования.

Применение метода синдромного кодирования позволяет эффективно решить известную проблему распознавания координат так называемых "духов" при регистрации множественности сигналов в тех случаях, когда используются двухкоординатные детекторы, например, годоскопические калориметры, как это показано на рис. 4, где $1/2 = 64$. Если использовать обычную систему регистрации, то даже при множественности $t = 2$ указанные на рисунке события невозможно идентифицировать однозначно. Если для вычисления синдрома по строкам и столбцам выбрать кодирующую матрицу для кода, исправляющего две ошибки, то на выходах соответствующих шифраторов будут получаться различные коды для двух симметричных относительно диагонали событий. Далее, после шифрации величины координат записываются

в ЭВМ. Таким образом, при такой схеме регистрации достаточно в спектрометре использовать двухкоординатные детекторы, а в память машины записываются отфильтрованные и сжатые данные. Многообразие существующих итеративных кодов позволяет смоделировать и разработать наиболее оптимальную для данной задачи систему кодирования и компрессии данных. Кроме того, значения координат событий, получаемых на выходах параллельных шифраторов могут быть использованы в специализированных процессорах для выработки сигналов, запускающих спектрометр. Более детально вопросы применения итеративных кодов в спектрометрах физики высоких энергий рассмотрены в пятой главе диссертации.

Специфика электронных методов физики высоких и сверхвысоких энергий приводит к необходимости исследования свойств как известных из теории кодирования кодов и кодирующих схем, так и разработке таких способов кодирования, при которых можно было бы эффективно использовать свойства тех или иных детекторов заряженных частиц. Суть дела в том, что в технике кодирования в основном для вычисления проверочных соотношений применяются сумматоры по модулю два, которые содержат в себе инверторы сигналов. Поэтому материалы второй главы диссертации посвящены исследованию методов построения суперпозиционных кодов, с помощью которых можно создавать экономичные схемы кодирования как для регистрации одночастичных событий

с кластерами, так и независимых срабатываний $t > 1$ датчиков с помощью сцинтилляционных годоскопов или блоков быстрой электроники. Исследование различных схем кодирования, применяемых в электронных методах физики высоких энергий показало, что в течение длительного времени,

скорее всего интуитивно, применяются слабо изученные в общей теории кодирования суперпозиционные коды. Как уже отмечалось выше, характерной особенностью таких кодов является то, что для формирования кода синдрома можно использовать усилители-смесители как световых, так и электрических сигналов. Основная проблема заключается в том, чтобы для числа q найти такое число Z , чтобы булева сумма q различных кодовых слов отличалась от каждой суммы q или меньшего числа кодовых слов. Кроме того, эти суммы должны отличаться от слагаемых. Важным параметром также является коэффициент разветвления сигнала. Поэтому основное внимание автора было сосредоточено на конструировании кодов с постоянным весом. С этой целью известные кодирующие схемы [8-11] были представлены в виде матриц и на простых контрпримерах показана неэффективность применяемых кодов с весами $w = 1$ и $w = 2$. Так, кодирующая матрица с $w = 1$ вырождается в единичную матрицу I_n , с помощью которой представляется унитарный позиционный код. Матрица, содержащая столбцы с весом $w = 2$, широко применяемая для кодирования данных в сцинтилляционных годоскопах при регистрации одночастичных событий, оказалась не плотно упакованной, так как она

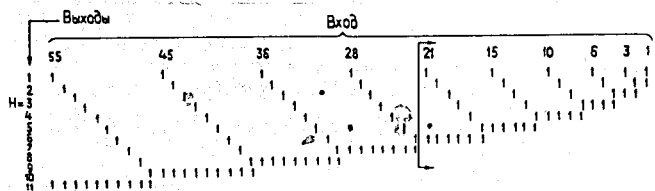


Рис.5. Пример плотно упакованной матрицы с $w = 2$.

таких матриц при $N = 11$ приведена на рис.5. Очевидно, что с ростом числа n коэффициент сжатия $K_c = C_N^2 / N$ растет быстрее, чем отношение $n/2n^{1/2}$. Анализ матрицы типа C_N^2 показал, что если построить соответствующее кодирующее устройство, то можно однозначно регистрировать координаты одночастичных событий с кластерами. Причем, длина регистрируемого кластера b растёт и определяется в основном количеством вычеркнутых столбцов M в ее "хвосте", что следует из соотношения [13].

$$M = \frac{b^2 - b}{2} \quad (I)$$

С целью повышения такого важного параметра, как коэффициент сжатия в процессе регистрации кластеров большой длины, автором диссертации предложен метод блочного кодирования, который может найти применение в калориметрах. Основная идея заключается в том, что группы счетчиков, рас-

положенных в отдельных сегментах калориметра, кодируется с помощью одной и той же матрицы, а сигналы "Быстрое ИЛИ" используются для кодирования тех номеров сегментов, от которых поступают данные. Увеличение коэффициента сжатия при больших величинах b происходит за счет того, что на кодирование номера сегмента требуется меньше разрядов, чем для представления числа столбцов в блоке.

Существенной новизной является разработанный автором диссертации метод построения матриц для оптимального кодирования параллельным способом независимых срабатываний датчиков годоскопической плоскости, например, сцинтилляторов. Этот метод основан на комбинаторном анализе и системы счисления в остаточных классах (СОК) [14-16]. Способ построения такой матрицы рассмотрим на конкретном примере. Рассмотрим следующие основания СОК: $P_1 = 2, P_2 = 3$ и $P_3 = 5$ и $P_1 = 2, P_2 = 3, P_3 = 5$ и $P_4 = 7$ с диапазоном чисел $P = 30$ и $P = 210$ соответственно. Тогда кодирующие матрицы будут содержать 30 и 210 столбцов соответственно. На рис.6 эти матрицы совмещены. Булева сумма всевозможных двух столбцов матрицы $H_{210,17}$ различна и поэтому возможна однозначная идентификация двух сигналов. Естественно возникает вопрос о построении кодирующей матрицы для $t = 2$ и $n = 30$ с оптимальным числом коэффициента сжатия. Для достижения такой цели вычеркнем в матрице $H_{30,17}$ последние пять столбцов и поменяем местами 11-ю и 12-ю строки. Далее, отбросив 12-ю строку, получим кодирующую матрицу с параметрами: $n = 30, N = 11, t = 2$ и $K_c = 30/11$. В об-

содержит $2n^{1/2}$ столбцов. Нетрудно проверить, что при $w = 2$ число столбцов должно быть $n = C_N^2$, где N - число строк. Одна из

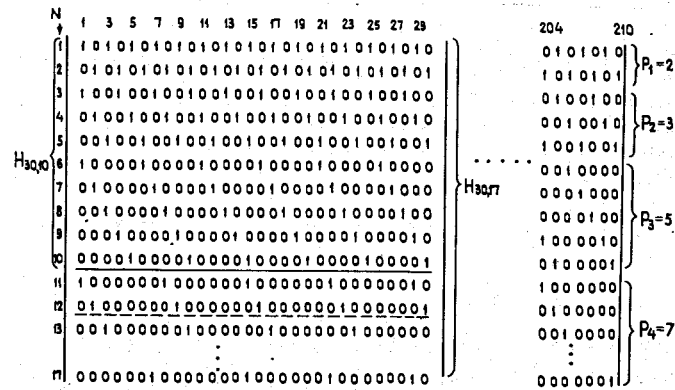


Рис.6. Структура кодирующих матриц $H_{30,11}$ и $H_{210,17}$.

шем виде коэффициент сжатия вычисляется из следующего выражения

$$K_c = \frac{\prod_{i=1}^l P_i P_2 P_3 \dots P_l}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}$$

Между числом используемых оснований СОК f и кодовым расстоянием $d = 2t + 1$ имеется простая связь $d = 2f - 2$. Во второй главе рассматриваются также экономичные последовательные методы регистрации событий.

В третьей главе диссертации показано, каким образом, предложенный метод синдромного кодирования, можно применить для создания быстродействующих мажоритарных схем совпадений (МСС). Суть дела в том, что при построении известных МСС не учитывается тот факт, что в заданный момент времени на входы устройства одновременно поступают лишь ограниченное число сигналов t по сравнению с числом каналов регистрации n . Поэтому с ростом числа каналов регистрации очень сильно растет требуемое количество микросхем даже при небольшой кратности совпадений. Применение ПЗУ не решает проблемы даже при $n = 20$, так как для этого потребовалась бы емкость памяти 2^{20} бит. В свою очередь, метод каскадирования приводит к увеличению задержек сигналов. Исследованный и разработанный автором

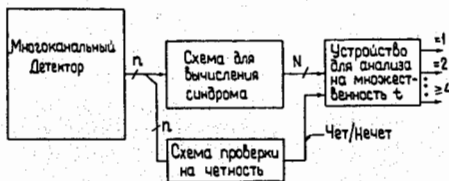


Рис.7. Типичная блок-схема МСС, в которой используется сжатие данных.

дан спектр весов, который получается при суммировании столбцов матрицы C_N^2 по правилам булевой суммы при $N = 11$ [17,18].

Таблица 2.

Распределение суммарных весов в зависимости от t при $n = 55$

t	Суммарный вес W	t	Суммарный вес w
1	2	2	3,4
3	3,4,5,6	4	4,5,6,7,8
5	4,5,6,7,8,9,10	6	4,5,6,7,8,9,10
7	5,6,7,8,9,10,11	8	5,6,7,8,9,10,11,
9	5,6,7,8,9,10,11	10	5,6,7,8,9,10,11
11	6,7,8,9,10,11	12	6,7,8,9,10,11
13	6,7,8,9,10,11	14	6,7,8,9,10,11
15	6,7,8,9,10,11	16	7,8,9,10,11
17	7,8,9,10,11	18	7,8,9,10,11
19	7,8,9,10,11	20	7,8,9,10,11

При фиксированном числе n и ростом t суммарный вес стремится к n , что позволяет регистрировать нижнюю границу множественности при регистрации кластеров большой длины. Алгоритм работы МСС заключается в следу-

щем. Как это следует из табл.2, если $t = 1$, то $w = 2$ и только. В результате получается простой алгоритм для отбора сигналов типа "один и только один". Если же вес $w = 3v4$ и есть признак "Чет", то $t = 2$ или 4. Далее, если вес $w = 3v4v5v6$ и есть признак "Нечет", то $t = 3v4v5v6v7v8v9v11$. Это свойство матрицы C_N^2 можно использовать для выделения границ регистрируемой множественности по максимуму и минимуму. Кроме того, как было показано во второй главе, с помощью такой матрицы можно построить устройство для определения координат кластеров. На примере конкретных разработок показана эффективность применяемого метода [18-21].

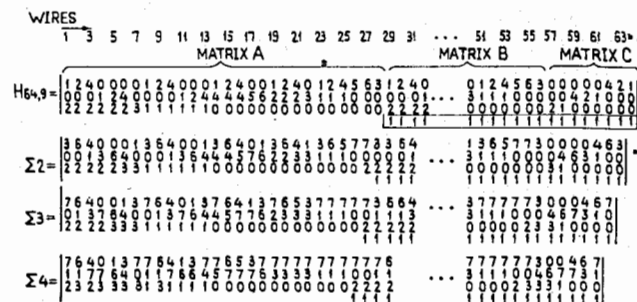


Рис.8. Кодировка матрица годоскопа-шифратора.

Разработанный годоскоп-шифратор на 64 входа используется в системе диагностики пучков заряженных частиц для регистрации данных, поступающих от пучковых МПК. Причем, каждая плоскость камеры содержит по 64 канала регистра-

ции. Поэтому для построения годоскопа-шифратора была составлена кодировка матрица, состоящая из двух комбинаторных матриц C_8^2 (рис.8) и единичной матрицы I_8 , что в сумме составляет 64 столбца. Вообще говоря, при 64 можно было бы использовать матрицу $C_{12}^2 = 66$. Однако, в этом случае пришлось бы использовать более дорогое ПЗУ. На рисунке дано компактное представление кодировки матрицы, где столбцы записаны в виде восьмеричных чисел. Символами $\Sigma 2, \Sigma 3$ и $\Sigma 4$ обозначены результаты суммирования по правилам булевой суммы двух, трех и четырех соседних столбцов кодировки матрицы. Для кодирования координат и величин кластеров используются ПЗУ на 8 и 9 входов для переменных. На рис.9 приведен зарегистрированный профиль пучка ядер лития [19].

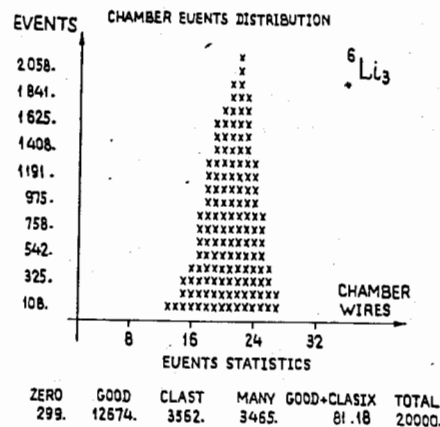


Рис.9. Зарегистрированный профиль пучка ядер лития.

Эффективность другого прибора [18], выполненного по методу синдромного кодирования была проверена в сеансах на спектрометре "АЛЬФА" [20]. Высокое быстродействие, требуемое для триггера первого уровня было достигнуто не только за счет применения быстродействующих микросхем, но и прежде всего за счет того, что для анализа 8-разрядного кода синдрома, формируемого с помощью элементов ИЛИ, достаточно использовать ПЗУ емкостью 256x4 бит. Рассмотрены также возможности расширения кратности совпадений до четырех путем применения дополнительных логических признаков. Причем, коэффициент сжатия можно существенно увеличить за счет исключения возможности регистрации координат одночастичных событий, если кодирование выполнять с помощью определенного количества одинаковых подматриц [21].

В четвертой главе диссертации дана систематизация и приведены основные понятия теории поля Галуа $GF(2^m)$, используемые в алгебраической теории кодирования. Исследованы и предложены быстрые алгоритмы для выполнения процедур над сложными алгебраическими выражениями. Суть дела в том, что развитый математический аппарат алгебраической теории в основном описывал последовательные методы кодирования, в то время как решение проблем быстрого определения множественности и координат событий в спектрометрах физики высоких энергий требовало развития и совершенствования эффективных методов аппаратной реализации основных алгебраических операций над элементами поля Галуа. Исходя из того, что алгебра Галуа носит модулярный характер, основные алгоритмы выполнения алгебраических операций и методы их аппаратной реализации рассмотрены на конкретных примерах (при фиксированных числах m). Прежде всего отмечается, что произвольный элемент поля $GF(2^m)$ можно представить тремя способами: в виде многочлена $m - 1$ степени, в виде вектора, m -разрядным словом циклического кода и в виде минтерма. Поскольку поле конечно, то и результаты всех операций принимают конечную форму. Практически это значит, при вычислениях сколь угодно сложных выражений в поле Галуа в результате получится один из элементов этого же поля. Исходя из этого факта автором сформулирован важный с практической точки зрения принцип выполнения совмещенных операций в поле Галуа, согласно которому при векторном способе выполнения операций над элементами поля с помощью ПЗУ, число входов последнего определяется не сложностью реализуемого алгебраического выражения, а количеством входящих в него различных элементов поля [22 - 24].

Существенным с практической точки зрения является известный факт, что такие операции как умножение, деление, возведение в степень и извлечение квадратного корня носят линейный характер. Поэтому для получения высокого быстродействия при выполнении таких операций можно исполь-

зовать логические элементы И и сумматоры по модулю два. Например, для умножения двух элементов в поле $GF(2^4)$ $A = A_0a^0 + A_1a^1 + A_2a^2 + A_3a^3$ и $B = B_0a^0 + B_1a^1 + B_2a^2 + B_3a^3$, где $A_0 - A_3$ и $B_0 - B_3$ - суть 0 или 1, $a^0 - a^3$ - базис поля достаточно реализовать следующие булевы выражения

$$\begin{aligned} P_0 &= A_0B_0 + A_1B_3 + A_2B_2 + A_3B_1 &< a^0 > \\ P_1 &= A_0B_1 + A_1B_0 + A_2B_3 + A_3B_2 &< a^1 > \\ P_2 &= A_0B_2 + A_1B_1 + A_2B_0 + A_3B_3 &< a^2 > \\ P_3 &= A_0B_3 + A_1B_2 + A_2B_1 + A_3B_0 &< a^3 > \end{aligned} \quad \text{mod 2. (2)}$$

Поскольку логический элемент К500ЛМ102 имеет задержку 2 нс, а схема проверки на четность К500ИЕ160 выполняет суммирование по модулю два за 6 нс, то для вычисления выражений (2) достаточно 8 нс.

Аналогично можно получить выражения для одновременного умножения трех, четырех и т. д. элементов поля, содержащие кратности совпадений более высокого порядка. Причем, быстродействие остается таким же, как и в случае умножения только двух элементов поля. Положив $A = B$, получим булевы выражения для возведения элемента A в квадрат $P_0^2 = A_0 + A_2$, $P_1^2 = A_2$, $P_2^2 = A_1 + A_3$, $P_3^2 = A_3$. Таким же способом получают выражения для возведения в более высокие степени причем, в случае больших чисел m можно применить аналитические вычисления на ЭВМ [25-27]. На примере поля при $m = 6$ показано, что операция извлечения квадратного корня из элемента поля также реализуется просто, как и операция умножения.

Также как и в обычной алгебре, в алгебре Галуа в ряде случаев можно эффективно использовать операции над логарифмами элементов поля. Однако, в известных методах одновременно выполняется операция над логарифмами двух элементов поля, что приводит к существенному увеличению времени, когда требуется умножить несколько элементов. Автором диссертации предложен алгоритм и соответствующее устройство, с помощью которого можно одновременно выполнять операцию циклического сложения степеней $2^m - 1$ и более элементов поля [28], что позволяет существенно увеличить быстродействие реализации сложных формул за счет применения параллельных счетчиков. Составлены диаграммы для расчета циклических компрессоров.

Большое внимание в четвертой главе диссертации уделяется решению проблемы универсального динамически программируемого модуля (УДПМ). Логические схемы и приборы современной ядерной электроники базируются на методах булевой алгебры. Однако, широко известные методы синтеза булевых функций большого числа переменных ($m > 4$) имеют ряд ограничений формального характера. Как следствие этого трудно полностью формализовать процесс создания минимизированных уравнений нужной логической схемы. Поскольку теория поля Галуа является естественным продолжением булева поля на случай многих переменных, то по мнению автора диссертации, эти трудности можно преодолеть, если более детально с помощью ЭВМ исследовать известное из теории представление переключательной функции m

переменных в виде полинома, в котором как переменные, так и их коэффициенты являются элементами поля Галуа $GF(2^m)$ [29-31].

$$F(X_0 X_1 X_2 \dots X_{m-1}) = B(0) + A(1) + A(2)X + \dots + A(2^m - 1)X^{m-1}.$$

Причем, коэффициенты $A(k)$ вычисляются из выражения [29-30].

$$A(k) = \sum_{i=1}^{2^m-1} a_i^k [B(0) + V(a_j)] - \text{элементы подстановки, которые получаются}$$

из таблицы соответствия входов и выходов, $B(0)$ - значение функции на нуле и $k = 1, 2, 3, \dots, 2^m-1$.

С помощью ЭВМ были проведены ряд расчетов конкретных устройств и показана перспективность развития такого направления в решении проблемы динамического перепрограммирования быстродействующих логических устройств [30]. Такое перепрограммирование выполняется путем изменения значений коэффициентов настройки $A(k)$, которые легко вычисляются и могут храниться в памяти микропроцессора. Дается описание одного из УДЦЛМ, разработанного автором диссертации [29, 31].

В материалах пятой главы диссертации изложены как теоретические, так и практические аспекты применения алгебраической теории кодирования для построения принципиально новых эффективных схем дискретной логики, таких как параллельные шифраторы для одновременного кодирования t сигналов, МСС, параллельные счетчики и быстродействующие координатные процессоры. Принципиальные схемы параллельных шифраторов создаются на основе проверочных матриц двоичного БЧХ-кода, которая в общем виде имеет вид [32, 33].

		Датчики					
a^0	a^0	1	1000	1000			
a^1	a^0	2	0100	0001			
a^2	a^0	3	0010	0011			
a^3	a^0	*4	0001	0101			
a^4	a^0	5	1100	1111			
a^5	a^0	6	0110	1000			
a^6	a^0	7	0011	0001			
a^7	a^0	8	1101	0011			
a^8	a^0	*9	1010	0101			
a^9	a^0	10	0101	1111			
a^{10}	a^0	11	1110	1000			
a^{11}	a^0	12	0111	0001			
a^{12}	a^0	*13	1111	0011			
a^{13}	a^0	14	1011	0101			
a^{14}	a^0	15	1001	1111			
		+	0001	0101			
		+	0101	0101			
		+	1111	0011			
		$S_1 =$	0100	$S_3 =$	0011	$S_5 =$	1110

Рис. 10. Кодировочная матрица для $n = 15$, $t = 3$ и $m = 4$. Знаком * обозначены сработавшие датчики.

числяются двоичные симметрические функции S_j , которые в сжатом виде несут

$$H^T = \begin{vmatrix} I & I & \dots & I \\ a^1 & a^3 & \dots & a^{2t-1} \\ a^2 & a^6 & \dots & a^{2(2t-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a^{n-1} & \dots & \dots & a^{(n-1)(2t-1)} \end{vmatrix}.$$

При фиксированных числах m и t и $n = 2^m - 1$ можно получить кодировочную матрицу, где элементы поля a^1 заменены их двоичными эквивалентами

(Рис. 10). С помощью таких матриц вы-

численные двоичные симметрические функции S_j , которые в сжатом виде несут

данные как о множестве сигналов t , одновременно поступающих на входы кодирующего устройства (шифратора), так и об их координатах [33 - 38]. Приводится описание схемы и способа построения параллельного шифратора с параметрами: $n = 63$, $t = 3$ и число выходов $N = 18$ [35]. В общем виде коэффициент сжатия $K_c = (2^m - 1)/mt$. Характерной особенностью параллельных шифраторов с алгебраической структурой является то, что их принципиальные схемы строятся с помощью простых аналитических соотношений, вытекающих из структуры кодирующих матриц, которые в свою очередь при заданных числах n , m и t строго определены и для их расчета при больших числах n можно использовать ЭВМ [45]. Рассмотрены вопросы минимизации количества сумматоров по модулю два, необходимых для построения шифраторов.

Алгоритм работы МСС основан на известной из теории кодирования теореме У. Питерсона: матрица L_t размерности $t \times t$ невырождена

$$L_t = \begin{vmatrix} S_1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ S_3 & S_1^2 & S_1 & 1 & \dots & 0 \\ S_5 & S_1^4 & S_3 & S_1^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{2t-1} & S_{2t-2} & S_{2t-3} & S_{2t-4} & \dots & S_t \end{vmatrix}.$$

если степенные симметрические функции зависят от t или $t + 1$ элементов поля и вырождена, если S_j зависят от меньшего, чем $t - 1$ числа различных элементов поля. Таким образом, для определения величины t необходимо вычислять значение определителя L_t . На рис. 10 в качестве примера блок-схема для вычисления определителей $I \div 4$ порядков. С целью существенно-го увеличения быстродействия каждое из значений определителя вычисляется независимо и с

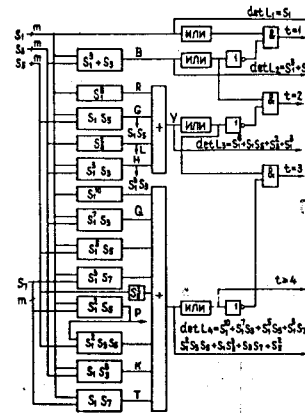


Рис. 11. Блок-схема для вычисления $\det L_4$ в поле $GF(2^m)$.

помощью обычных логических элементов анализируется на "0" или "1" [34]. Причем, схема на рис. 11 составлена таким образом, чтобы для вычисления отдельных компонент определителей можно было бы использовать ПЗУ, содержащее $2m$ входов для переменных, так как в этом случае обеспечивается умножение двух элементов с помощью одного модуля. Для получения еще более высокого быстродействия можно вместо ПЗУ использовать обычные интегральные микросхемы. Нетрудно заметить, что наряду с получением неравенств типа $t >$ с помощью предложенного метода можно, что весьма важно, формировать строгие равенства регистрируемых величин t .

В данной главе приводится также методика построения МСС с алгебраической структурой и описание принципиальных схем специализированного процессора, построенного в соответствии с матрицей, изображенной на рис. 10 [40].

$$K_c = \frac{\prod_{e=1}^s n_e}{n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots + n_{s-1} k_{s-1} + n_s k_s}$$

Чаще всего принимается, что $n_1 = n_2$. В конце данной главы описываются несколько конструкций итеративных кодов, разработанных автором для годоскопических систем. Учитывая многообразие возможных итеративных кодов, [3, 43, 44] в диссертации рекомендуется в начале выполнить моделирование конкретной физической задачи с учетом таких параметров, как n и t и затем сконструировать необходимый оптимальный итеративный код. Приводится также сравнение эффективности БЧК-кодов и итеративных кодов в зависимости от топологий событий. Одним из недостатков итеративного кодирования является отсутствие строгих математических методов декодирования. Однако, при относительно небольших величинах n и t можно использовать для этих целей ПЗУ или программируемые матрицы. Именно по этому пути пошли разработчики трекового процессора для эксперимента NA28 в ЦЕРНе, где была использована созданная при участии автора схема кодирования типа Хэмминг-ИЛИ [3].

Комплексный подход к исследованию проблем регистрации множественности и координат событий свидетельствуют результаты исследований автора, изложенные в шестой главе диссертации. Еще в 1965 г. т. е. на три года раньше, чем в зарубежных физических центрах автором был разработан и внедрен приоритетный шифратор параллельно-последовательного типа, аналоги которого в интегральном исполнении получили широкое применение в системах автоматизации физических экспериментов на линии с ЭВМ [46-48] как с применением тактовых импульсов так и с асинхронным управлением, отличающийся высоким быстродействием и экономичностью.

Многие направления в электронных методах физики высоких энергий развиваются под влиянием достижений математической логики и вычислительной техники. В связи с широким развитием таких детекторов, как годоскопические калориметры, стриповые детекторы и проч. появилась необходимость в получении с высоким быстродействием суммы большого количества чисел, поступающих от АЦП. Как показали исследования автора диссертации, хороший результат можно получить, если применить метод параллельной компрессии данных, применяемый в быстрых схемах умножения [49]. В свою очередь, компрессоры данных в основном состоят из параллельных (n, k) -счетчиков, которые нашли самостоятельное применение в качестве устройств отбора сигналов в годоскопических системах с большой регистрируемой множественностью [50], а также при построении специализированного процессора для отбора событий по разности числа частиц, прошедших через годоскопическую плоскость [51]. Суть метода параллельной компрессии поясняется с помощью рис. 14, где показан пример одновременного суммирования семи 7-разрядных чисел. Высокое быстродействие при таком методе достигается за

счет того, что с помощью (n, k) -счетчиков одновременно подсчитывается количество единиц одинакового веса в исходных слагаемых.

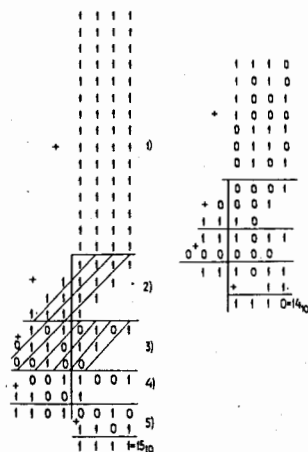


Рис.14. К пояснению метода параллельной компрессии.

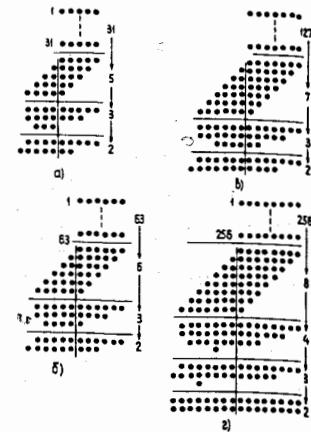


Рис.15. Диаграммы для расчета параллельных компрессоров.

В зависимости от числа слагаемых количество этапов компрессии а также число входов n параллельных счетчиков может быть различным, что следует из диаграмм, приведенных на рис.15. В итоге на последнем этапе компрессии для суммирования двух слагаемых применяются обыкновенные сумматоры. Расчеты, приведенные в шестой главе диссертации показывают, что, используя микросхемы 500-й серии можно просуммировать 127 7-разрядных чисел за 90 нс. Приводятся примеры применения параллельных счетчиков.

В приложениях к диссертации описаны основные разработки приборов и систем, выполненных в стандарте КАМАК. Впервые в странах-участницах ОИЯИ автором диссертации были разработаны наиболее важные и сложные приборы - контроллеры для малых ЭВМ [52] с учетом новейших достижений электроники [53-55]. Эти приборы нашли применение в физических установках [56] и в системе автоматизации положением пучка медленного вывода. Впервые в нашей стране разработан комплекс аппаратуры для последовательной системы КАМАК [58-61], которая отличается высокой надежностью и мобильностью в системах регистрации и автоматизации данных, расположенных на больших площадях, таких как ускорительные комплексы [62-64].

В приложениях П1 - П5 рассматриваются структурные схемы контроллеров различного типа и их назначения, драйвер последовательной ветви и набор вспомогательных приборов, необходимых для успешного внедрения комплекса разработок в системы автоматизации ускорительного

комплекса [62] и в спектрометры физики высоких энергий [63]. С помощью разработанной автором диссертации аппаратуры получены важные физические результаты [57,65].

III. Основные результаты и выводы.

1. В диссертации проведено широкое и комплексное исследование проблем аппаратной фильтрации полезных событий в процессе регистрации множественности и координат сигналов, и автоматизации сбора и обработки данных, регистрируемых в спектрометрах физики высоких энергий и на выведенных пучках заряженных частиц ускорительного комплекса синхрофазотрона ОИЯИ. В условиях бурного развития физики высоких и сверхвысоких энергий, неуклонного роста числа каналов регистрации и усложнения критериев отбора редких событий и процессов стало очевидным, что необходим нетрадиционный подход к решению столь сложной задачи. Как показали исследования автора диссертации, эффективное решение проблемы возможно на стыке таких направлений, как алгебраические методы обработки сигналов, методики электронных методов физики высоких энергий и ядерной электроники. Результатом исследований в теоретическом аспекте явилось объединение в одну дисциплину алгебраической теории кодирования и алгебраических методов обработки сигналов для решения задач фильтрации и обработки данных в спектрометрах физики высоких энергий, что можно квалифицировать, как новое направление в методике электронных методов физики высоких энергий.

2. Разработанный и адаптированный математический аппарат алгебраической теории кодирования и быстрые алгоритмы дали возможность впервые в мировой практике решить проблему регистрации множественности сигналов и определение координат позиционно-чувствительных датчиков, от которых они поступили, параллельным способом без элементов памяти и в оптимально кодированном виде. Как вследствие этого были открыты и исследованы ряд принципиально новых устройств дискретной логики, таких как параллельные шифраторы с широкими функциональными возможностями, счетчики кластеров, мажоритарные схемы совпадений с возможностью параллельного счета, и координатные процессоры с алгебраической структурой. Применение алгебраической теории обработки сигналов в годоскопических системах позволяет оптимизировать аппаратные затраты при создании быстродействующих устройств отбора полезных событий с учетом таких параметров, как число каналов регистрации, верхняя граница регистрируемой множественности и время задержки сигналов. Особенно эффективно решается проблема разрешения неопределенностей в процессе определения координат множественных событий с помощью только одной двумерной годоско-

пической плоскости, что позволяет существенно упрощать спектрометр в целом.

3. Выполнено комплексное исследование и конструирование эффективных суперпозиционных кодов, с помощью которых разработано ряд кодирующих устройств со световой кодировкой.

4. В процессе исследования основных задач была решена проблема строгого расчета и автоматизации проектирования устройств с алгебраической структурой на базе аналитических выкладок и расчетов на ЭВМ. Получены результаты, имеющие самостоятельное значение. Показано, что при большом числе переменных более эффективным по сравнению с математическим аппаратом булевой алгебры является метод синтеза переключательной функции с помощью алгебры Галуа $GF(2^m)$. Использование такого аппарата позволяет в перспективе создать гибкую систему универсальных динамически программируемых модулей для решения такой важной проблемы в методике электронных экспериментов, как бесконтактное перепрограммирование быстродействующих систем отбора событий на выполнение различных задач в процессе эксперимента с помощью микро-ЭВМ.

5. Метод синдромного кодирования и разработанные автором диссертации быстрые алгоритмы для выполнения операций в поле Галуа могут найти применение в таком важном направлении в современном приборостроении, как синдромное тестирование (сигнатурный анализ) сложных систем, содержащих микропроцессоры и большие интегральные микросхемы.

6. Теоретически обоснованный метод синдромного кодирования является мощным инструментом для разработчиков быстродействующих систем отбора и обработки событий в спектрометрах физики высоких энергий. Этот метод используется как в нашей стране, так и в такой известной организации, как ЦЕРН. Поскольку он базируется на математическом аппарате, то основные идеи метода могут быть использованы также и в других многодатчиковых системах регистрации.

7. Результатом комплексного подхода к исследованию проблемы эффективного считывания и обработки данных, регистрируемых в многоканальных детекторах заряженных частиц, явилась разработка методов и устройств приоритетного кодирования, получивших широкое применение в системах автоматизации физических экспериментов и опередивших аналогичные разработки за рубежом.

8. Дано изящное решение проблемы суммирования цифровых сигналов, регистрируемых в годоскопических калориметрах с помощью АЦП, на основе метода параллельной компрессии данных. Показано, какими широкими функциональными возможностями обладают параллельные счетчики, используемые как самостоятельные приборы, так и для построения параллельных компрессоров данных и для создания специализированных процессоров.

9. Разработан комплекс аппаратуры в стандарте КАМАК для автоматизации физических экспериментов на линии с ЭВМ. Ряд приборов, таких как контроллеры для малых ЭВМ, были разработаны и внедрены впервые не только в нашей стране, но и среди стран-участниц ОИЯИ. Внесен творческий вклад в развитие программно-управляемых блоков и систем в стандарте КАМАК. С помощью разработанной и внедренной последовательной системы КАМАК эффективно решена проблема регистрации и автоматизации физических экспериментов и системы наладки и индикации пучков ускорительного комплекса.

Таким образом, принципиальным отличием исследованного и предложенного метода синдромного кодирования заключается в следующем. В известных методах аппаратной фильтрации полезных событий использовались в основном алгоритмы, основанные на позиционной системе счисления и тактируемые устройства с элементами памяти. В предлагаемом методе используется алгебра конечных полей, где операции над элементами поля выполняются с помощью комбинационных схем гораздо проще и быстрее. Причем, данные, регистрируемые в годоскопической плоскости, предварительно сжимаются в отношении $n / \log_2 n$, где n - число каналов регистрации и t - наибольшая величина множественности регистрируемых сигналов в одной годоскопической плоскости, что позволяет более эффективно использовать методы табличной арифметики для решения поставленных задач. В отличие от метода хеширования, применяемого для аналогичных целей в ЦЕРНе, в предлагаемом методе имеется однозначное соответствие между адресами программируемой памяти и таблицами соответствия этим адресам [65].

Результаты диссертации отражены в следующих основных публикациях:

1. Никитяк Н.М. Фильтрация цифровой информации на линии с электронной вычислительной машиной в физике высоких энергий. ПТЭ, 1983, No.2.
2. Nikityuk N.M., Radhabov R.S., Shafranov M.D. A new method of information registration from multiwire proportional chambers. Nucl. Instr. and Meth., 1978, vol. 155, No. 3.
3. Никитяк Н.М., Раджабов Р.С., Шафранов М.Д. Устройство для считывания информации с координатной камеры. Авт. свид. СССР No. 602894, Бюл. ОИ, 1978, No. 14, с. 171.
4. Никитяк Н.М. Программно-управляемые блоки в стандарте КАМАК. "Энергия", М., 1977.
5. Никитяк Н.М. Микропроцессоры и микро-ЭВМ. Применение в приборостроении и в научных исследованиях. "Энергоиздат", М., 1981..
6. Никитяк Н.М. Электронные методы экспериментальной физики высоких энергий. Лекции для молодых ученых ОИЯИ, П1-87-909, Дубна, 1987.
7. Никитяк Н.М. От современной алгебры - к специализированным процессорам. Лекции для молодых ученых ОИЯИ, П10-87-401, Дубна, 1987.

8. Nikityuk N.M. The method of syndrome coding and its application for data compression and processing in high energy physics experiments. JINR, E-10-88-29, Dubna, 1988. Доложен на первой объединенной конференции по символической алгебре и применению корректирующих кодов ISSAC-88 и ААЕСС-6, Рим, 1988.
9. Никитяк Н.М. Вопросы оптимального кодирования данных в годоскопических системах. ПТЭ, 1983, No. 3.
10. Никитяк Н.М. Сцинтилляционный годоскоп. Авт. свид. СССР, No. 991 835, Бюл. ОИ, 1985, No. 5, с. 209.
11. Никитяк Н.М. Сцинтилляционный годоскоп. Авт. свид. СССР No. 1088506, Бюл. ОИ, 1985, No. 47, с. 274.
12. Комолов Л.Н., Никитяк Н.М., Номоконова А.И., Светов А.Л. Применение параллельного шифратора в модифицированном коде Грея для регистрации кластеров. ПТЭ, 1987, No. 6.
13. Никитяк Н.М. Устройство для регистрации центра кластера. Авт. свид. СССР No. 1260889, Бюл. ОИ, 1986, No. 36, с. 194.
14. Никитяк Н.М. Метод синдромного кодирования для последовательных систем обработки данных в спектрометрах физики высоких энергий. Сообщение ОИЯИ, П10-88-742.
15. Никитяк Н.М. Устройство для регистрации информации с координатной камеры. Авт. свид. СССР No. 1333847, Бюл. ОИ, 1986, No. 34, с. 187.
16. Александров И.Н., Никитяк Н.М., Романов Ю.И. Устройство для регистрации информации с координатной камеры. Авт. свид. СССР No. 1260888, Бюл. ОИ, 1986, No. 36, с. 194.
17. Никитяк Н.М. Устройство для обработки данных при регистрации множественности заряженных частиц. Авт. свид. СССР No. 1181426, Бюл. ОИ, 1986, No. 33, с. 278.
18. Никитяк Н.М., Селиков А.В. Способ и устройство для регистрации множественности сигналов в годоскопических системах с применением метода синдромного кодирования. ПТЭ, 1987, No.6, с.55-61.
19. Никитяк Н.М., Рукояткин П.А., Светов А.Л. Параллельный годоскоп-шифратор на 64 входа для регистрации одночастичных событий с кластерами. Препринт ОИЯИ, No. П10-89-17, 7 с.
20. Науман Л., Никитяк Н.М., Пискунов Н.М., Шаров В.И. Многоканальный блок с управляемыми задержками для регистрации сигналов от сцинтилляционного годоскопа. Сообщение ОИЯИ, No. П10-88-353, Дубна, 1988.
21. Никитяк Н.М. Метод регистрации множественности в годоскопических системах с большим числом каналов регистрации. ПТЭ, No.3, с.59-65.
22. Никитяк Н.М. Устройство для выполнения операций возведения в степень, деления и умножения двух элементов в поле Галуа GF(2^m). Авт. свид. СССР No. 1236458, Бюл. ОИ, 1986, No. 21, с. 199.

23. Никитяк Н.М. Устройство для умножения и возведения в степень двух элементов в поле Галуа $GF(2^m)$. Авт. свид СССР No. 1236457, Бл. ОИ, 1986, No. 21, с. 199.
24. Никитяк Н.М. Совмещенные операции в поле Галуа $GF(2^m)$. ОИЯИ, No. II-87-54, Дубна, 1987.
25. Nikityuk N.M. Some questions of using coding theory and analytical calculation methods on computers. JINR, E11-87-10, Dubna, 1987.
26. Gaidamaka R.I., Nikityuk N.M. Application of analytical transformation and calculation on computer for synthesis of problem of devising logic modules. JINR, E10-88-53, Dubna, 1988. Доложен на первой объединенной международной конференции ISSAC-88 и AAECC по применению символической алгебры и корректирующих кодов, Рим, 1988.
27. Гайдамака Р.И., Никитяк Н.М. Расчет специпроцессора, оперирующего над элементами поля Галуа $GF(2^m)$ с помощью программы, написанной на языке SCHOONCHIP. Доклад на международном совещании по системным методам аналитических вычислений на ЭВМ и применению в теоретической физике. ОИЯИ, No. P10-1272, Дубна, 1979.
28. Никитяк Н.М. Быстрые алгоритмы для одновременного выполнения операции умножения над элементами в поле Галуа $GF(2^m)$. ОИЯИ, No. P10-88-852, Дубна, 1988.
29. Никитяк Н.М. Новый способ построения универсального логического модуля. ОИЯИ, No. P11-85-365.
30. Александров И.Н., Гайдамака Р.И., Никитяк Н.М., Шириков В.П. Расчет переключаемых функций, представленных элементами поля Галуа $GF(2^m)$. ОИЯИ, 1984, No. P10-84-465, Дубна, 1984.
31. Никитяк Н.М. Устройство для реализации переключаемых функций в поле Галуа $GF(2^m)$. Авт. свид. СССР No. 1234861, Бл. ОИ, 1986, No. 20, с. 229.
32. Никитяк Н.М. Метод синдромного кодирования и его применение для быстрого отбора событий на основе специпроцессоров, оперирующих в поле Галуа $GF(2^m)$. ОИЯИ, No. P11-80-484.
33. Никитяк Н.М. Процессор для определения координат частиц в координатной пропорциональной камере. Авт. свид. СССР No. 875403. Бл. ОИ. 1981, No. 39, с. 259.
34. Никитяк Н.М. Устройство для отбора t ядерных частиц. Авт. свид. No. 1075829, Бл. ОИ, 1989, No. 28, с. 207.
35. Никитяк Н.М., Раджабов Р.С., Шафранов М.Д. Параллельный шифратор для многопроводных пропорциональных камер. ПТЭ, 1978, No. 4.
36. Гайдамака Р.И., Калинин В.А., Никитяк Н.М., Шириков В.П. Новый способ построения мажоритарных схем совпадений. ОИЯИ, No. P13-82-628, Дубна, 1982.

37. Nikityuk N.M. Algebraic coding theory. Electronic Newsletters, No. 11, CERN, Geneva, 1982.
38. Никитяк Н.М., Раджабов Р.С., Шафранов М.Д. Устройство для считывания данных с координатных камер. Авт. свид. СССР No. 705480, Бл. ОИ, 1979, No. 47, с. 224.
39. Никитяк Н.М. Быстрые алгоритмы для координатных процессоров в поле Галуа $GF(2^m)$ при множественности $t < 3$. ОИЯИ, No. P10-88-853, Дубна, 1988.
40. Никитяк Н.М. Специализированный процессор с алгебраической структурой для быстрого отбора физических событий. Препринт ОИЯИ, No. P10-87-254, Дубна, 1987.
41. Никитяк Н.М. Быстрые алгоритмы для координатных процессоров в поле Галуа $GF(2^m)$ при множественности $t = 4$ и $t > 5$. Сообщение ОИЯИ, No. P10-89-16, Дубна, 1989.
42. Никитяк Н.М. Теоретические основы создания специализированных процессоров для обработки событий с кластерами. Сообщение ОИЯИ, No. P10-89-854, Дубна, 1989.
43. Никитяк Н.М. Итеративные коды и их применение в устройствах для регистрации событий в многоканальных детекторах заряженных частиц. ОИЯИ, No. P10-87-266, Дубна, 1987.
44. Никитяк Н.М. Устройство считывания информации с координатной камерой. Авт. свид. СССР No. 1072618, Бл. ОИ, 1984, No. 45, с. 209.
45. Гайдамака Р.И., Никитяк Н.М., Шириков В.П. Комплекс программ для автоматизации логического проектирования устройств считывания информации, разрабатываемых на базе алгебраической теории кодирования. В трудах международного совещания по системным методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. ОИЯИ, No. P10-1272.
46. Никитяк Н.М. Регистр с последовательным опросом. Авт. свид. СССР No. 1855559, Бл. ОИ, 1966, No. 17, с. 93.
47. Никитяк Н.М., Самойлов В.Н., Шюсслер Р. Устройство для преобразования унитарного двоичного кода в двоичный с асинхронным способом управления. ПТЭ, 1984, No. 2, с. 69-74.
48. Никитяк Н.М. Устройство считывания информации с координатной камерой. Авт. свид. СССР No. 1172381, Бл. ОИ, 1986, No. 30, с. 124.
49. Быстрые и экономичные алгоритмы для специализированных процессоров. Регистрация суммарного импульса в калориметрах. Сообщение ОИЯИ, P10-88-241, Дубна, 1988.
50. Гуськов Б.А., Калинин В.А., Крастев В.Р., Максимов А.Н., Никитяк Н.М. Быстродействующий параллельный счетчик. ПТЭ, 1984, No. 6.
51. Калинин В.А., Никитяк Н.М. Быстрый аналого-цифровой процессор для отбора событий по разности чисел частиц. ПТЭ, 1986, No. 1, с. 71-72.

52. Никитик Н.М. Малые ЭВМ семейства PDP-II "Обзор". Зарубежная радио-электроника, 1976, No. 3.
53. Никитик Н.М. Ручной контроллер в стандарте КАМАК. ПТЭ, 1971, No. 6.
54. Никитик Н.М. Контроллер для связи крейта КАМАК с ЭВМ ТРА-1001. ОИЯИ, No. 10-7337, Дубна, 1973.
55. Никитик Н.М., Смирнов В.А. Контроллер для связи крейта КАМАК с ЭВМ HP2116B. ОИЯИ, No. 11-6124, Дубна, 1973.
56. Аверичева Т.В., Балдин А.М., Никитик Н.М. и др. Установка для исследования кумулятивного рождения частиц "ДИСК". ОИЯИ, No. 1-11317, Дубна, 1978.
57. Даматов Я.М., Дэчинпунцаг Ч., Никитик Н.М., Номоконова А.И., Семенов В.Н. Контроллер каркаса для последовательной системы КАМАК. Управляющие системы и машины, 1981, No. 3.
58. Даматов Я.М., Дэчинпунцаг Ч., Кофман В.М., Никитик Н.М., Номоконова А.И., Семенов В.Н. Последовательный драйвер, управляемый от магистрали КАМАК. ОИЯИ, No. 13-12028, Дубна, 1978.
59. Даматов Я.М., Никитик Н.М., Шюсслер Р. Десятиканальный цифровременной преобразователь в стандарте КАМАК. ОИЯИ, No. 13-13001, Дубна, 1980.
60. Даматов Я.М., Никитик Н.М., Номоконова А.И. Запоминающее устройство динамического типа с произвольной выборкой емкостью 4Kx16. ОИЯИ, No. 13-80-494, Дубна, 1980.
61. Даматов Я.М., Никитик Н.М. Тестовый блок и методика наладки последовательной системы КАМАК. ОИЯИ, No. P11-80-529, Дубна, 1980.
62. Даматов Я.М. Водопьянова Н.А., Кириллов А.Д., Никитик Н.М. и др. Применение последовательной системы КАМАК для контроля и управления параметрами магнитооптических элементов на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий. ОИЯИ, No. 10-81-257, Дубна, 1981. Доложен на IV Всесоюзной конференции "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ, Новосибирск, 1981.
63. Гусаков Д.В., Дьяченко В.М., Макаров Л.Г., Никитик Н.И., Толстов К.Д. Установка для исследования релятивистских частиц и ядер с протяженными мишенями. ОИЯИ, No. 13-87-240, Дубна, 1987.
64. Воронко В.А., Дьяченко В.М., Костин В.Я., Мигалёна В.Я., Мирошник В.С., Никитик Н.М. и др. Взаимодействие релятивистских протонов и ядер ^{12}C со свинцовой мишенью. Сообщение ОИЯИ, No. P1-88-703, Дубна, 1988. .
65. Nikityuk N.M. Some Questions of Using the Algebraic Coding Theory for Construction of Special-Purpose Processors in High Energy Physics Spectrometers. JINR, E10-89-362 Submitted to International Conference AAECS 7, Toulouse Cedex, France, 26.06.89

Рукопись поступила в издательский отдел
26 октября 1989 года.