

0754



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 519.23:681.3.06

На правах рукописи

10-87-53

ОСОСКОВ

Геннадий Алексеевич

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ
И ПЕРВИЧНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

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

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1987

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

А. Ф. ПИСАРЕВ

Доктор физико-математических наук,
профессор

Ю. П. ПЫТЬЕВ

Доктор технических наук,
профессор

Г. Т. АРТАМОНОВ

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

Автореферат разослан "___" _____ 1987 года.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1987 года

в ___ часов на заседании специализированного совета Д047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации по адресу: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, ЛБТА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь специализированного
совета

Иван З. М. Иванченко

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая диссертация посвящена созданию полной системы математических методов и алгоритмов автоматического измерения и первичного анализа изображений в ядерной физике на основе систематического и последовательного применения вероятностных и статистических методов. Созданный математический аппарат реализован в виде программного обеспечения ряда конкретных измерительных систем.

Актуальность проблемы

Объемы данных в современных экспериментах ядерной физики и физики высоких энергий могут достигать миллионов единиц информации в секунду. Регистрация и оперативный анализ этих гигантских потоков цифр за время, диктуемое темпами исследования, стали возможными только благодаря последним достижениям ядерной электроники и вычислительной техники, обеспечившим автоматизацию процессов измерения и обработки данных физических экспериментов. Во всех крупных физических центрах Советского Союза и других стран-участниц ОИЯИ были проведены широкомасштабные исследования и разработки автоматизированных просмотров-измерительных и сканирующих систем для фильмовой обработки.

В последнее десятилетие было также создано большое число бесфильмовых систем обработки, из которых в рамках диссертационной темы будут исследованы методы телевизионного съема данных с трековых камер.

При создании программного обеспечения таких автоматических систем потребовалось создать алгоритмы для замены человека в его функциях измерения и распознавания экспериментальных данных. Среди этих алгоритмов наиболее сложными с математической точки зрения явились алгоритмы первичного анализа данных, включающего задачу фильтрации, т.е. распознавания и отбора координат полезных точек в общем потоке данных автоматического сканирования, а также задачу калибровки данных для учета дисторсий сканатора и определения ионизационной плотности следов частиц.

Очевидно, что эти задачи являются хотя и важными, но лишь частными в общей проблеме автоматизации физических измерений, где возникает целый комплекс подобных задач, связанных с организацией функционирования всего измерительного устройства как системы, работающей под

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

управлением ЭВМ, с накоплением и кодированием данных, их первичным анализом и т.д. При этом решение таких задач в каждом конкретном случае оказалось весьма существенно зависящим от вычислительных, алгоритмических, технических аспектов их реализации и режима выполнения (в реальном времени управляющей ЭВМ или офф-лайн на большой ЭВМ, или на специализированной вычислительной системе параллельного действия).

В условиях быстрого развития современной физики элементарных частиц значимость проблемы комплексной автоматизации процессов измерения и анализа экспериментальных данных только возрастает, так как решение этой проблемы, позволяющее оперативно получить физический результат, в некоторых случаях оказывается более сложным делом, чем создание самой экспериментальной установки, и может стать определяющим фактором при выборе эксперимента.

Проведенный в гл. I анализ большого числа работ, описывающих различные отечественные и зарубежные системы фильмовой обработки, показывает, что эффективность решения задач, возникающих на последовательных этапах автоматизированных измерений и обработки изображений в физике элементарных частиц, обуславливалась тем, насколько хорошо удавалось учесть в системе специфику конкретного эксперимента, измерительного прибора и используемых вычислительных средств.

Отсюда неизбежна разнотипность идей и методов, лежащих в основе программ, обеспечивающих автоматические режимы работы на этих этапах.

Адаптация и перестройка таких программ на другие типы изображений, сканирующих устройства или ЭВМ могут иногда занимать больше времени, чем разработка новых программ. Характерным примером являются управляющие программы для встроенных ЭВМ, написанные в целях повышения эффективности в автокодах этих ЭВМ. Более того, слишком жесткая ориентация методов, заложенных в программы распознавания, часто оказывалась принципиальным препятствием к их перестройке на иные источники данных. В то же время многочисленность и различие типов и применений измерительных устройств обуславливают объективную необходимость в разработке таких общих, универсальных методов автоматизации измерений изображений следов частиц и штриховых образов вообще, которые, подобно человеческой способности к распознаванию, были бы минимально зависимы от типа изображения и вида сканирования или легко к ним адаптировались. Необходимой общности в решении проблемы было естественно добиваться как по линии исследования и обобщения накопленного опыта, так и на более радикальных путях создания новых методов алгоритмизации интуитивных способностей человека и других операций, позволяющих заменить его в функциях измерения при достаточном уровне точности и достоверности. Кроме того, требовалось исследовать новые способы съема камерных изображений, такие, как бесфильмовый телевизионный съем, а

также появляющиеся возможности применения методов параллельной обработки для первичного анализа данных.

В диссертации изложены результаты, полученные автором в период 1964-86 гг. Работы, положенные в основу диссертации, выполнены в соответствии с проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ и планами международного сотрудничества ОИЯИ.

Цели и задачи исследования

Основными целями диссертации явились:

- исследование, теоретическое обобщение и создание новых универсальных математических методов для эффективного решения всего комплекса задач автоматизации измерений и их первичного анализа;
- развитие новых, быстрых и экономичных алгоритмов, реализующих предложенные методы с учетом возможностей параллельных вычислений;
- создание ряда конкретных систем программного обеспечения как в фильмовом, так и бесфильмовом методах съема информации.

Конкретными задачами исследований и разработок являются:

- выработка общих принципов управления измерительными устройствами для создания программных средств, осуществляющих значительное повышение степени автоматизации программирования в реальном времени, а также реализация этих средств на наиболее распространенных типах встроенных ЭВМ;
- исследование и анализ различных измерительных систем для выявления основных принципов и разработки общей стратегии фильтрации, которая должна определять главные этапы фильтрации и гарантировать от грубых просчетов в разработке систем программ;
- создание новых математических методов и алгоритмических средств первичного анализа данных, отвечающих требованиям универсальности, повышения скорости, точности и надежности вычислений, а также достоверности получаемых оценок параметров. Сюда относятся следующие задачи:
 - исследование процессов фильтрации в условиях сильной неоднородности выборки для создания быстрых устойчивых к шумам алгоритмов прослеживания треков;
 - создание оптимальных алгоритмов бесфильмового телесъема информации, допускающих параллелизм обработки и предназначенных для сжатия данных в реальном времени телевизионного сканирования и для распознавания изображения по сжатым данным;
 - исследование статистических и вычислительных аспектов калибровочных измерений, предназначенных для компенсации дисторсий аппаратуры, и создание нового математического аппарата для калибровки в ортогональной и неортогональной системах координат;

- исследование вероятностной структуры стримерных треков и создание методов оценки ионизационных параметров по данным автоматических измерений.

Разработанный математический аппарат и алгоритмические средства требовалось применить как основу для создания математического обеспечения ряда конкретных измерительных систем с учетом современных тенденций в организации данных и структурного подхода к программированию.

Научная новизна и значимость работы

Комплексные проблемы такого рода, затрагивающие широкий круг вопросов из самых различных областей знаний, не могут быть решены в рамках какой-то одной теории. Поэтому постановка и разработка новых, общих методов решения возникающих при этом разнородных математических проблем могла быть выполнена только на стыке целого ряда разделов математики, таких, как теория вероятностей и математическая статистика, вычислительная математика, методы Монте-Карло, символьные вычисления, распознавание образов и кластеризация, минимизация функционалов, системное программирование и т.д. При этом ни в одной из указанных областей математики не было готовых методов и решений, поставленные задачи не поддавались, как правило, аналитическому решению, а требовали разработки новых методов или привлечения их из смежных областей. Для объединения всех этих задач в одном научном направлении потребовался общий подход, единая методология как постановки математических проблем автоматизации измерений, так и их решения.

Предлагаемая автором методология основана на широком и систематическом применении методов теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания для создания и исследования вероятностных моделей обрабатываемой экспериментальной информации, а также процессов ее преобразования в ходе измерений и обработки, изменений загрузки обслуживающей вычислительной системы и т.д.

Модели, связанные с ядерно-физическими изображениями, относятся к широкому классу бинарных штриховых изображений, возникающих в самых различных научно-технических приложениях (графики самописцев, чертежи, осциллограммы и т.д.). Исследование общих свойств таких моделей вероятностными и статистическими методами позволило разработать новый универсальный математический аппарат фильтрации, калибровки и других процедур первичного анализа. Для этого потребовалось получить ряд новых теоретических результатов, относящихся к робастным регрессионным оценкам, распознаванию связанных кластеров точек, системам массового обслуживания с бесконечным числом каналов, многомерным полиномиальным аппроксимациям, быстрым аппроксимационным алгоритмам, разработке и проверке новых генераторов случайных чисел и др. Кроме этого, оказалось необходимым заново решить важные задачи программиро-

вания, такие, как создание нового специализированного алгоритмического языка для написания управляющих программ, оптимальная организация данных и программных модулей в больших системах программ, параллеливание алгоритмов распознавания.

Разработанный теоретический аппарат позволил получить новые общие эффективные решения основных задач первичного анализа данных. Среди полученных прикладных результатов отметим следующие: быстрые алгоритмы сжатия данных при бесфильмовом телевизионном съеме, допускающие аппаратное исполнение, и параллельную реализацию метода реконструкции треков по данным сжатия; быстрые робастные алгоритмы прослеживания треков, позволяющие находить и присоединять к треку сразу группы точек; надежные глобальные алгоритмы распознавания; универсальные программы калибровки, алгоритмы автоматической оценки плотности треков при различных видах сканирования (в том числе при сканировании целью и полутоновых измерениях).

Вероятностные модели обрабатываемых потоков экспериментальной информации, построенные для конкретных систем, дали возможность сделать выбор оптимальных схем управления и сопряжения ЭВМ, ведущих измерения и обработку, а также провести необходимый отбор методов и алгоритмов путем сравнительной оценки характеристик, получаемых в ходе первичного анализа. На стадии разработки систем эти оценки проводились по методу Монте-Карло, а в дальнейшем после появления реальных данных уточнялись статистическими методами. На основе последовательного системного подхода на всех этапах разработки каждой из конкретных систем математического обеспечения, рассмотренных в диссертации, был проведен сбалансированный учет требований к системе по ее экономичности, эффективности, по скорости измерений и их обработки при заданных максимально возможных точностных характеристиках результатов.

Практическая полезность работы

Разработанный математический аппарат и методика исследований, предложенные в настоящей диссертации, дали возможность создать и внедрить программные системы и комплексы, ставшие основными компонентами для таких автоматизированных измерительных систем ОИЯИ и других физических и научных центров, как автоматы "Спиральный измеритель" и АЭЛТ-2/160, система просмотрово-измерительных столов БПС-2 в ОИЯИ, автомат Spiral Reader в ЦЕРНе, что позволило получить новые физические результаты и способствует интенсификации научных исследований.

Общность предложенных в диссертации методов и алгоритмов управления автоматизированными устройствами и первичной обработки данных с трековых детекторов допускает их применение для более широких клас-

сов приборов и штриховых изображений. Это иллюстрируется в работе на примере приложения к решению важной медицинской задачи, связанной с измерением и обработкой данных о поверхности роговицы глаза.

Большинство основных положений диссертации используется в лекционном спецкурсе для студентов физических специальностей МГУ по автоматизации измерения и обработки данных физического эксперимента и вошли в учебную монографию /1/.

Следующие основные результаты диссертации выдвигаются для защиты:

1. Принципы и общая методика имитационного моделирования потоков информации со сканирующих автоматов и процессов ее преобразования в ходе измерения и обработки, а также вероятностные модели для конкретных измерительных систем.

2. Предложенные и обоснованные принципы управления и контроля измерительных автоматов и разработанные программные средства автоматизации программирования в реальном времени.

3. Результаты анализа методов распознавания штриховых образов по данным с оптических трековых детекторов, позволившие сформулировать общие принципы стратегии фильтрации и реализовать их в виде эффективных алгоритмов и программ фильтрации для конкретных измерительных систем.

4. Предложенная методика и полученные результаты исследования вопросов сжатия данных при бесфильмовом телевизионном съеме информации со стримерных камер, показавшие, что созданные алгоритмы быстрого сжатия обладают достаточной помехоустойчивостью и точностью и допускают реализацию в виде специальной аппаратуры сжатия данных и параллельных программ восстановления треков.

5. Развитие методов робастных оценок параметров и динамической кластеризации и их применения для создания и теоретического обоснования общих эффективных и помехоустойчивых алгоритмов распознавания и фильтрации трековой информации.

6. Разработанный математический аппарат для создания универсальных программ калибровки измерительных систем с ортогональной и неортогональной системами координат.

7. Вероятностные модели процессов измерения ионизационной плотности треков, позволившие поставить и решить задачи оценки относительной ионизации для сканирующих устройств различных типов.

8. Приложения разработанного математического аппарата для создания и внедрения программных комплексов, ставших основными компонента-

ми для ряда автоматизированных измерительных систем, что подтверждено актами о внедрении и применении результатов диссертации, статусными публикациями и авторским свидетельством на изобретение.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Всемирном конгрессе математиков в Москве (1966), Международных совещаниях по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна, 1964, 1966, 1971, 1973, 1978, 1983), Европейской конференции статистиков (Варна, НРБ, 1979), Международных симпозиумах: по мини- и микро-ЭВМ (Будапешт, ВНР, 1980), по вычислительной статистике (Марсель, Франция, 1982; Прага, ЧССР, 1984), по теории информации (Ташкент, 1984), Всесоюзных семинарах: по обработке физической информации (Ереван, 1976, 1978), по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях (Душанбе, 1980), Всесоюзных конференциях: по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ (Новосибирск, 1981), по теории вероятностей и математической статистике (Вильнюс, 1981), на 38-й сессии секции Ученого совета ОИЯИ по физике высоких энергий (Дубна, 1984), на научных семинарах Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, Института измерений и измерительной техники САН (Братислава, ЧССР), отдела трековых камер ЦЕРН (Женева, Швейцария).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 45 печатных работ, в том числе одна монография.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, приложений, списка литературы из 333 наименований, содержит 299 страниц печатного текста, 51 рисунок и 12 таблиц.

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 выполнен обзор работ, описывающих известные измерительные системы, способы сканирования изображений и задания целеуказаний, сокращающих поток данных. Анализ этапов и применяемых методов автоматической фильтрации и других процедур первичного анализа позволил установить общие приемы и недостатки этих методов, выбрать направления исследования, определить терминологию и поставить математические задачи для каждого из направлений.

Рассмотрение способов фильтрации, применяемых в известных системах фильмовой обработки, показало неадекватность используемых в них моделей экспериментальных данных предположению о нормальности отклонений точек $\{x_i, y_i\}$, $i=1, \overline{N}$, составляющих данные сканирования снимка, от модельных уравнений трека $y = f(x; \theta)$. Наличие значительного числа шумовых точек, засоряющих выборку, приводит к существенным нарушениям этого предположения для отклонений $e_i = y_i - f(x_i; \theta)$, $i=1, \overline{N}$. В таких случаях применяются так называемые робастные методы статистического оценивания параметров треков, в которых квадратичный функционал метода наименьших квадратов (МНК) заменяется на

$$I_{\theta} = \sum_i \rho(e_i / \hat{\sigma}), \quad (1)$$

где $\rho(t)$ - функция вклада, растущая медленнее, чем $t^2/2$, а $\hat{\sigma}$ - оценка масштаба. Однако для применения робастных методов в нашем случае требовалось предварительно провести их сравнительное исследование и усовершенствование на случай больших засорений выборки с целью оптимизации функции $\rho(t)$, способа масштабирования, а также применения к нелинейным моделям трека.

Требовалось провести исследование методов обработки данных при бесфильмовом телевизионном съеме, чтобы выбрать алгоритмы быстрого сжатия данных и последующего восстановления треков без потери физической информации.

В задаче оценки ионизации следов частиц существовали только эмпирические формулы для пузырьковых треков. Требовалось разработать общие теоретически обоснованные оценки ионизационной плотности, учитывающие специфику стримерных треков, а также различных способов сканирования (в том числе сканирование щелью). Координатная система (u, v) автоматических измерительных приборов, как правило, неортогональна, а координаты (u_i, v_i) $i=1, \overline{N}$ точек, выдаваемых отсчетными системами прибора, искажены его дисторсиями. Для взаимного перевода измеренных значений в некоторую унифицированную прямоугольную систему координат (X, Y) , связанную с изображением, необходимы специальные калибровочные преобразования как прямое

$$X = F(u, v; A) ; \quad Y = G(u, v; B) , \quad (2)$$

так и обратное

$$u = F^{-1}(X, Y; A') ; \quad v = G^{-1}(X, Y; B') . \quad (3)$$

Функции F и G принято представлять в виде разложения по системе некоторых базисных функций $\{\varphi_j(x, y)\}$

$$F(u, v; A) = \sum_{j=1}^m a_j \varphi_j(x, y) ; \quad G(u, v; B) = \sum_{j=1}^m b_j \varphi_j(x, y) . \quad (4)$$

Для оценки коэффициентов a_j и b_j и установления точностных характеристик прибора выполняется процедура калибровки, состоящая в сканировании некоторого эталонного изображения и последующей статистической обработки полученных калибровочных данных. В качестве эталонного изображения принимают решетку из достаточно большого числа M крестов, координаты (x_k, y_k) ; $k=1, \overline{M}$ центров которого известны с высокой точностью. В ходе последующей обработки прежде всего распознаются данные, относящиеся к каждому из крестов, вычисляются координаты их центров (u_k, v_k) $k=1, \overline{M}$ со среднеквадратичными погрешностями (s_{u_k}, s_{v_k}) для сопоставления с идеальными координатами центров (x_k, y_k) , $k=1, \overline{M}$. На следующем основном этапе калибровки по этим данным вычисляют оценки \hat{A} и \hat{B} векторов параметров преобразования (4), определяют точность и стабильность прибора. Из-за невозможности простого обращения нелинейных функций F и G обратное калибровочное преобразование (3) также представляется в виде разложения по базису $\{\varphi_j(u, v)\}$ с коэффициентами, также подлежащими оценке в ходе калибровки.

Анализ способов оценки калибровочных параметров, применявшихся в известных системах, показал, что эти способы не были общими из-за отсутствия разработанного математического аппарата. Требовалась корректная постановка и решения ряда методических и вычислительных задач калибровки.

Далее в обзоре рассмотрены чисто программные аспекты создания комплексов программ первичного анализа. Показана необходимость системного подхода, в частности, в организации структур данных и программных модулей. Проанализированы также вопросы программирования в реальном времени, от решения которых зависит эффективность работы измерительного автомата, и обоснована потребность в специализированном алгоритмическом языке для написания программ управления такими автоматами и мобильного транслятора с этого языка в автокоды наиболее распространенных управляющих мини-ЭВМ.

В конце обзора дана систематизация общих методов имитационного моделирования сложных систем и делается вывод о необходимости разработки математических моделей потоков информации с различными измерительных устройств и процессов ее преобразования в ходе оцифровки и первичного анализа. Изучение общих свойств таких моделей служит основой для дальнейших исследований. Поэтому последующее изложение было начато с разработки вероятностных моделей данных автоматического сканирования. Этой задаче посвящена вторая глава диссертации.

Полная модель процессов преобразования экспериментальной информации представляет собой иерархию уровней, начиная от генерации исходного физического события и имитации условий эксперимента до уровней, имитирующих процессы измерения (оцифровка, появление статистических ошибок при измерении и накоплении данных), и самых низких уровней генерации случайных воздействий.

Обсуждая принципы моделирования, автор подчеркивает, что они должны обеспечивать выполнение баланса между простотой и точностью модели, приводит примеры удачного осуществления этого требования в конкретных моделях, реализующих общую методику моделирования потоков оцифрованных данных со сканирующими автоматами. Суть этой общей методики, подробно изложенной в разделе 2.2, состоит в существенном упрощении модели изображения события в трековой камере и перенесении акцента на имитацию факторов, связанных с процессом измерения: тип сканирования, погрешности, связанные с дискретизацией при оцифровке, сбоями сканатора и фоновой информацией.

Это позволило создать модели для следующих конкретных экспериментов и измерительных устройств: параллельного и спирального сканирования фильмовых данных, бесфильмового телевизионного съема, ионизационных измерений стримерных треков, включая полутонные измерения.

Реализация модели для случая параллельного сканирования, хотя и не представляла трудностей в математическом плане, оказалась необходимой при решении задач по выбору алгоритмов быстрого сжатия при бесфильмовом съеме ^{1,2/} и распознаванию треков ^{3,12/}, а также последующей отладке и оптимизации программ.

Более сложной математически оказалась модель процессов оцифровки и учета шумовых точек при спиральном сканировании ^{8,14/}, позволившая создать и отладить программы фильтрации и калибровки "Спирального измерителя" еще на стадии проектирования прибора.

Для нахождения методов оценки ионизационной плотности стримерных треков потребовалась имитация трека со случайным разбросом центров, размеров и яркостей стримеров и учет деталей схем оцифровки сигналов. Такая вероятностная модель, предложенная в работе ^{15/}, активно использовалась как для проверки применимости уже известных способов измерения ионизации, так и при проведении теоретических исследований ^{11/}, позволивших предложить ряд новых, надежных способов измерения плотностей треков ^{16,17/}.

Рассмотрение потока данных и проектируемой системы с позиций математической теории массового обслуживания как потока заявок и соответствующей дисциплины обслуживания, позволило решить такие сложные задачи, типичные для центров обработки экспериментальной информации, как расчет оптимальной структуры системы с пульсирующей за-

грузкой и выбор приоритетов в системе разнотипных ЭВМ, обслуживающих измерительно-вычислительный комплекс.

В первой задаче, связанной со случайной периодической загрузкой оборудования, источник данных имеет периодическую интенсивность $\lambda(t)$ с периодом T , отличную от нуля лишь на временном интервале $t_1 \leq t$, называемом периодом регистрации. Именно таким образом поступает информация между циклами ускорителя или импульсного быстрого реактора, а также в измерительных устройствах, в которых цикл сканирования T распадается на рабочий ход t_1 и обратный ход луча.

При накоплении данных с помощью ЭВМ сигналы, случайно пришедшие подряд за время, меньшее τ - мертвого времени накопителя (например, магнитной ленты), теряются. Однако при выполнении условия $\tau \int_0^{t_1} \lambda(t) dt < t_1$, возникает возможность устранить или хотя бы свести к минимуму эти потери путем применения быстрой (и поэтому дорогой) буферной памяти (БП) объема m .

Задача состоит в определении оптимальной величины m , обеспечивающей минимум потерь, в качестве которых обычно принимают относительное среднее число Q_n сигналов, потерянных за период, или в более жесткой постановке вероятность P_n потери хотя бы одного сигнала.

После того как задача была решена методом Монте-Карло для некоторых конкретных случаев, автором было найдено решение в общей постановке. Система рассматривается в моменты t_i ($t_i - t_{i-1} = \tau$; $i = 1, 2, \dots$) передач в основной накопитель. Процесс регистрации можно описать с помощью двух случайных целочисленных последовательностей: $\{\nu_i\}$ - число сигналов, поступающих на вход за время $(t_{i-1} - 0, t_i)$ и $\{\xi_i\}$ - число сигналов, находящихся в БП в момент $t_i + 0$. В работе ^{19/} доказана теорема, представляющая связь этих последовательностей

$$\xi_i = \max\{0, \min(m, \xi_{i-1} + \nu_i) - 1\}; \quad i = 1, 2, \dots,$$

марковость вектора $\vec{\xi}_i = (\xi_i, \dots, \xi_{i+r-1})$ и явно определяющая циклическую матрицу M переходных вероятностей. Для установления искоемых вероятностных характеристик полученной периодической цепи Маркова, ее рассматривают в моменты, кратные T , т.е. переходят к цепи с матрицей M^T . Эта новая цепь будет уже регулярной и для нее существует система финальных вероятностей, получаемых при $t \rightarrow \infty$, которые позволяют вычислить искоемые характеристики потерь при различных m и таким образом решить задачу. Из-за большой размерности уравнений для финальных вероятностей возникли значительные вычислительные трудности, которые удалось преодолеть с помощью приема, сокращающего в T/t_1 раз размерность матриц за счет исключения нулевых элементов.

Вторая задача по определению алгоритмов диспетчеризации при проектировании системы реального времени (СРВ), предназначенной для накопления данных нескольких разнотипных экспериментов и одновременного обслуживания автомата НРД, была решена методом имитационного моделирования. На первом этапе исследования^{/20/} были накоплены и обработаны реальные статистические данные о работе измерительно-вычислительного центра ЕрФИ, давшие вероятностное описание и конкретные значения параметров как входных потоков от экспериментальных установок и заявок на обслуживание НРД, так и соответствующих времен обслуживания.

Для построения модели был выбран язык СИМУЛА-67. Это позволило построить общую модель СРВ рассматриваемого типа, а потом оптимизировать ее, сравнивая различные варианты дисциплины обслуживания, определяющие работу диспетчера СРВ.

Необходимое внимание уделено в диссертации созданию программного инструментария, обеспечивающего быстроту и удобство моделирования, т.е. методам разработки и проверки программных генераторов случайных чисел (ГСЧ), а также стандартных программ статистического анализа (построение гистограмм, манипуляции с ними, мощные, но быстро вычисляемые статистические критерии).

Автор непосредственно участвовал в создании и исследовании ГСЧ для многих отечественных ЭВМ, в том числе базовых ЭВМ ОИЯИ. Эти ГСЧ прошли проверку в многолетней эксплуатации^{/5, 21, 22/}. Создан ряд экономичных программ-генераторов для получения случайных величин с законами распределения, наиболее употребительными в физических исследованиях и прежде всего - нормальным^{/23/}, экспоненциальным^{/24/} и пуассоновским^{/25/}.

Предложены, проверены по эффективной системе тестов и внедрены ГСЧ для микро- и персональных ЭВМ^{/34/}.

Материал третьей главы касается неотъемлемой части математического обеспечения любой измерительной системы - программных средств для управления и проверки измерительных автоматов. На основе требований к измерительным системам и вытекающих из них функций управляющих ЭВМ автором еще в 1970 г. был разработан один из первых специализированных алгоритмических языков FORPLAN^{/6/} для написания программ реального времени и создана серия трансляторов с него для наиболее известных типов мини-ЭВМ^{/26/}.

При разработке языка был выбран подход, учитывающий ситуацию, характерную для таких физических центров, как ЦЕРН, ОИЯИ и др., когда данные, получаемые от встроенной ЭВМ, подлежат затем обработке на мощной ЭВМ, снабженной транслятором и библиотекой программ на языке

Фортран, наиболее понятном физикам-пользователям. Поэтому язык FORPLAN строился на основе фортрано-подобных операторов, а транслятор с него также был реализован в виде фортранной программы. Это позволило перенести на большую ЭВМ все проблемы с трансляцией, редакцией и отладкой и преодолеть основные трудности программирования на встроенных ЭВМ, в том числе невозможность усовершенствования матобеспечения на самой встроенной ЭВМ, занятой процессом управления. Кроме того, выбор Фортрана и перенесение трансляции на большую ЭВМ позволило осуществить реализацию матобеспечения за короткий срок, а в дальнейшем упростить работы по его перенесению на ЭВМ БЭСМ-6 для других типов мини-ЭВМ.

Язык FORPLAN был составлен из элементов трех уровней:

1. Подмножества машинно-независимых арифметических, логических и управляющих операторов Фортрана, включаемых в исходные программы с помощью макроопределений;
2. Машинно-зависимых операторов управления, реализуемых с помощью аппарата стандартных функций и подпрограмм;
3. Команд автокода встроенной мини-ЭВМ, необходимых прежде всего для обеспечения совместимости с ранее написанным математическим обеспечением.

Подробное описание языка FORPLAN в нормальной форме Бэкуса приведено в^{/27/}. В диссертации дано краткое описание языка и принципов трансляции с него. Наиболее сложной явилась задача выбора управляющих операторов второго уровня, ориентированных на обслуживание измерительных устройств с помощью аппарата прерываний, использующего командно-статусные регистры (КСР) отдельных подустройств и измеряемую шкалу приоритетов. В подобной схеме управления операторы второго уровня следует синтезировать не из целых управляющих подпрограмм (что сделало бы язык слишком машинно-зависимым), а из тех их частей, которые являются общими в программах управления разными устройствами. Такая общность ведет к идее об унификации формы стандартных функций, реализующих управляющие операторы для различных подустройств, путем присвоения каждому из подустройств номера, используемого как параметр функции. Этот же прием позволяет реализовать алгоритмы управления на основе методов структурного программирования в виде модулей, представляющих группы действий из структурных конструкций с одним входом и одним выходом, состоящих из последовательных, условных, циклических и селективных инструкций. Минимальный набор базовых машинно-зависимых операторов FORPLAN, приведенный в качестве примера в разделе 3.2, позволяет осуществить управление автоматическим измерением, а при необходимости подключения дополни-

тельного устройства дает возможность перестроить систему приоритетов, не прибегая к перезагрузке управляющей программы.

Примеры практического применения этих операторов можно найти в /7,28/. Разнообразие конкретных систем управления лишает смысла любую попытку дать общее их описание. В этом и нет необходимости, т.к. CORPLAN ориентирован на представление пользователю готового, достаточно гибкого аппарата для включения в состав языка новых управляющих операторов.

В описании принципов трансляции с языка CORPLAN следует отметить решение неисследованных вопросов автоматического разбиения протранслированного текста программы на страницы /26/, важное для мини-ЭВМ типа "Электроника-100" с малой длиной адресной части слова. Показателем высокой мобильности фортранного транслятора с CORPLAN явилась его реализация на мини-ЭВМ PDP-9, отечественных машинах "Электроника-100", М-6000, а также на самой мини-ЭВМ, имеющей в составе своего матобеспечения транслятор с Фортрана /29/. В качестве примеров приложения CORPLAN'a к управлению измерительными приборами приведены программы для ежедневной тестовой профилактической проверки автомата Spiral Reader в ЦЕРНе /7/ и программы управления автоматом НРД ЕРЭИ, предназначенные для обработки информации с искровых камер и астрофизических данных /28/.

В разработке языка CORPLAN, относящейся к началу 70-х годов, были предвосхищены основные современные требования к языкам реального времени: слабая типизация с абстракцией данных, достаточной для круга решаемых задач, структурой управления IF и GOTO, подпрограммами и функциями, обеспечивающими модульность структуры, возможности инициализации не только переменных, но и параллельных процессов, программирования устройств низкого уровня, раздельная компиляция модулей и т.д.).

Эти возможности языка CORPLAN, наряду с принципами и опытом в конструировании операторов управления, остаются актуальными и могут быть применены в автоматизации программирования для современных систем управления и обработки в реальном времени.

Центральной в диссертации является четвертая глава, посвященная проблемам автоматической фильтрации трековой и, вообще, бинарной штриховой информации, разработке адекватного математического аппарата и его применению к созданию фильтрующих программ для сканирующих автоматов "Спиральный измеритель" (СИ), АЭЛТ-2/160, бесфильмовой телевизионной системы.

Опыт создания и внедрения различных программ первичной обработки был впервые сформулирован автором в виде общей стратегии фильтрации /3/, суть принципов которой состоит в требованиях отсева ненужной

информации на возможно более ранней стадии обработки, максимального использования априорной информации, сокращения перебора данных и стремления к одномерному поиску, целесообразности включения человека в распознавание, если это не замедляет работу системы и, наконец, наличия быстрой обратной связи с окончательными геометрическими и физическими результатами обработки. Несмотря на внешнюю очевидность каждого из этих принципов, неуклонное следование им всегда позволяло выиграть время и добиться успеха в решении компромисса между надежностью и скоростью, т.к. помогало избежать просчетов в алгоритмах, лучше организовать данные и программы в системе обработки. В качестве одного из примеров успешной реализации этой стратегии приведен комплекс программ фильтрации СИ ОИЯИ /30/, находящийся в эксплуатации в действующей системе массовых измерений. Принципы стратегии побуждают также к дальнейшему развитию методов фильтрации, как это показано на примерах введенной автором процедуры NEWPOL, обеспечивающей лучшую селективность методов поиска близких треков, входящих в "узкую" пару, или разработки экономичной станции спасения событий на базе стандартных терминальных и программных средств.

Новым явилось исследование вопросов сжатия данных при бесфильмовом телесъеме информации со стримерных камер. Как показано в работе /2/, алгоритмы сжатия, известные из фильмовой обработки, оказываются неприменимыми из-за жестких и противоречивых требований бесфильмового съема, когда перемер изображения в случае ошибки при обработке невозможен, сама обработка должна вестись быстро, в темпе телевизионного сканирования и в то же время быть точной и не допускать информационных потерь. Детальное исследование проблемы на модельных и реальных данных позволило разработать быстрые алгоритмы сжатия, удовлетворяющие этим требованиям и ориентированные на аппаратную реализацию на базе современных микропроцессоров. Предложенные алгоритмы основаны на параллельной обработке отдельных слайсов изображения с проведением сортировки отсчетов в каждой скан-линии для восстановления связности между отсчетами одного и того же трека и быстрого направленного отслеживания одновременно всех сегментов треков в данном слайсе с последующей аппроксимацией их линейными трековыми элементами (ЛТЭ), длина которых при заданной точности δ ($0,2 \pm 0,3$ мм в камере) зависела от кривизны трека, наличия разрывов и пересечений с другими треками. Такой подход не требовал буферной памяти для запоминания всего изображения или каких-то его частей и позволял обходиться минимумом аппаратуры. Метод позволял увеличить длину слайса по сравнению с другими известными способами в несколько раз. Замена обычной линейной аппроксимации на кусочно-линейную не приводит к потере скорости при аппаратной реализации, благодаря применению ассоциативного процессора /9/.

В итоге сжатия реальное изображение из 1+2 тыс. точек дает несколько десятков ЛТЭ. Добавление к выходной информации данных о плотности каждого ЛТЭ и массива координат неидентифицированных точек снижает коэффициент сжатия с 10 до 3+4.

На основе этих алгоритмов разработан проект аппаратуры сжатия данных (АСД)^{/9/}. Создан программный имитатор АСД, который позволил провести исследование^{/2/} по выбору критериев качества сжатия и с их помощью выполнить оптимизацию параметров АСД на реальных данных телевизионного съема со стримерной камеры установки РИСК.

Для распознавания треков по данным сжатия разработан глобальный (т.е. применимый сразу ко все элементам) алгоритм, основанный на таблице попарной близости ЛТЭ с учетом соответствия их концов и недопущения выхода дуги, соединяющей концы отрезков, за коридор ширины δ . После этого последовательное объединение ЛТЭ в треки, начиная с самых близких пар, проводилось известным в теории кластеризации методом "ближайшего соседа". Поскольку поиск треков на ЭВМ проводится сразу над всем множеством ЛТЭ и требует только операций упорядочивания, суммирования и умножения, этот алгоритм явился хорошим объектом для реализации его на ЭВМ параллельного действия с ассоциативной памятью. Соответствующая программа^{/10/}, разработанная впервые для задач такого рода, выполняет основную часть вычислений по объединению ЛТЭ в треки.

Для дальнейшего развития методов распознавания треков потребовалась теоретическая проработка как глобальных методов распознавания, так и упоминавшихся уже робастных методов оценки параметров.

Была разработана методика сравнительного исследования робастных М-оценок (оценок типа максимального правдоподобия)^{/31/}, согласно которой проведены детальные численные эксперименты для сравнения М-оценок с ограниченными и неограниченными функциями вклада $\rho(t)$ (см.(1)) в рамках регрессионной модели

$$Y = X\theta + E, \quad (5)$$

где $Y = (y_1, \dots, y_n)$ - вектор наблюдений, $X = (x_{ij})_{i=1}^n, j=1}^m$ - матрица факторов, θ - вектор искомых параметров, $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ - вектор ошибок наблюдений, для которых приняты модель ε -загрязненного нормального распределения

$$f(x) = (1 - \varepsilon) \varphi(x) + \varepsilon h(x), \quad (6)$$

где $\varphi(x) = \sigma \sqrt{2\pi} \exp(-x^2/2\sigma^2)$, $h(x)$ - зашумляющее распределение. Специальное внимание было уделено учету влияния таких факторов, типичных для трековой информации, как устойчивость к уровню шумов ε , точкам разбалансировки (т.е. точкам с большим отклонением

e_i , лежащим после разрыва в факторном пространстве (см. рис.1), размерность и связь компонент вектора θ .

В качестве критерия сравнения применялось среднеквадратичное отклонение от истинной регрессии, усредненное по нескольким тысячам реализаций, а также вычислительные характеристики процедур оценки параметров: скорость сходимости, требуемые ресурсы ЭВМ и т.д. Для качественного объяснения поведения минимизируемых функционалов разработаны и успешно применены методы графической визуализации поверхностей этих функционалов (см. рис.2).

На основе сравнительного исследования, проведенного по указанной методике, получены новые результаты теоретического и прикладного характера.

Решены следующие важные задачи, возникающие при приложении робастных М-оценок к фильтрации трековых данных:

а) получена функция вклада^{/32/}

$$\rho(t) = (1+c) \ln \frac{1+c}{c + \exp(-t^2/2)}, \quad (7)$$

оптимальная с точки зрения максимального правдоподобия в условиях сильного равномерного засорения выборки, когда в (6) $h(x)=h_0$ в интервале длины $1/h_0 \gg \sigma$ и $\varepsilon > 1/2$. Ограниченность функции (7) существенна лишь для $c > 0,1$, что соответствует тяжелому засорению выборки;

б) получен и теоретически обоснован алгоритм получения совместной робастной оценки параметров положения и масштаба, инвариантной относительно преобразований сдвига и умножения^{/32/}. Проверка алгоритма в численном эксперименте показала высокую эффективность совместной М-оценки вплоть до значений $\varepsilon = 0,9$ (это соответствует отношению сигнал/шум лишь 0,1);

в) предложен метод масштабной нормировки, позволяющий повысить устойчивость М-оценок при появлении нескольких локальных минимумов функционала (1), неизбежном при больших засорениях ($\varepsilon > 0,2$), когда применяются ограниченные функции вклада $\rho(t)$ ^{/33/}. Метод, особенно эффективный при наличии точек разбалансировки, состоит в нормировке остатков \hat{e}_1 в (1) не на общую для всех точек $\hat{\sigma}$, а на величину d_1 , где d_1^2 - индивидуальная, точечная дисперсия остатка \hat{e}_1 , перевычисляемая на каждой итерации процедуры взвешенного МНК-оценивания по формуле

$$d_1^2 = \sigma^2 (1 + N_1 N_1^T - 2N_1 A_1); \quad i=1, n,$$

где $N_1 = \bar{x}_1 (X^T W X)^{-1} X^T W$, T - символ транспонирования, A_1 - i -й базисный вектор в R^n , W - диагональная матрица

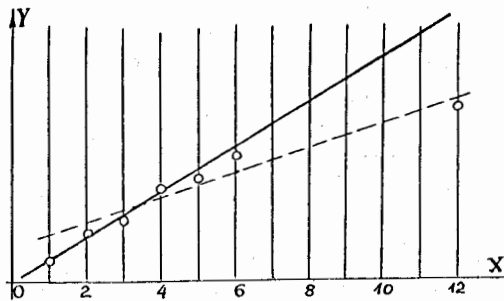


Рис. 1

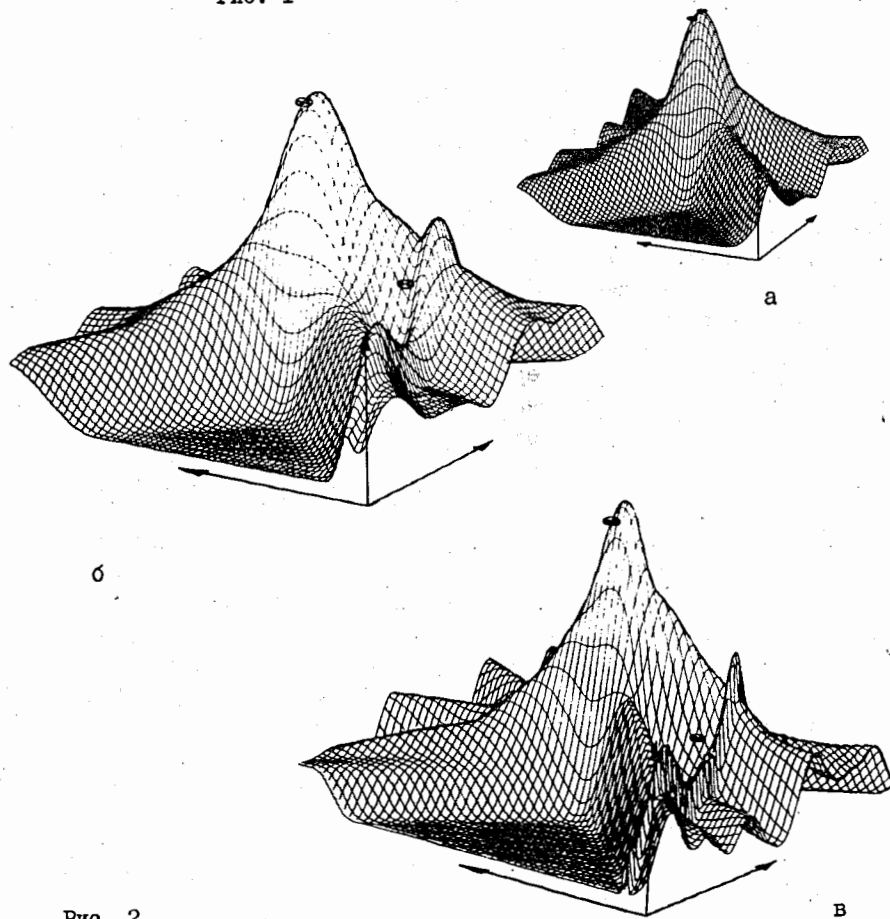


Рис. 2

весов, \bar{x}_i - вектор (x_{i1}, \dots, x_{im}) . Качественное представление действия такой "студентизации" остатков при $m=2$ дано на рис.2, где изображены поверхности $z = -L(\theta_1, \theta_2)$ а) при отсутствии точек разбалансировки, б) при их наличии, в) после студентизации, вызывающей сокращение площади горизонтальной проекции постороннего пика, что уменьшает вероятность попадания в эту область вычисляемой оценки.

Применение этих теоретических результатов к задаче фильтрации позволило повысить точность экстраполяции и скорость прослеживания треков за счет присоединения не одной, а целой группы точек. Важным прикладным результатом исследований по робастным оценкам явилось создание и внедрение программ фильтрации для автомата АЭЛТ-2/160/33/ принятых в эксплуатацию в настоящее время.

С учетом опыта применения программ фильтрации в диалоговых фильмовых системах и бесфильмовой системе съема данных предложен новый подход к реализации стратегии фильтрации, использующий глобальное распознавание сразу всех треков изображения^{12/}. В сравнении с классической схемой (начальный поиск + МНК - прослеживание) достоинства предложенного подхода состоят в повышении правдоподобия результатов, большей гибкости при адаптации к системам целеуказаний и лучшей приспособленности к реализации на ЭВМ параллельного действия.

Подход основан на использовании принципа максимального правдоподобия для организации распознавания сразу всех треков путем динамически перестраиваемой кластеризации элементов изображения. В функцию правдоподобия была заложена модель изображения из некоторого числа M треков, локально аппроксимируемых окружностями на фоне сильного равномерного засорения, т.е. распределение отклонений $e_i(x, y)$ случайно выбранной точки от i -го трека ($i = \overline{1, M}$) имеет плотность (6) с $h(x) = const$. Это позволяет найти порог D , задающий правило классификации точек по принадлежности к тому или иному треку и при известной таблице локальных параметров треков разбить все точки на M кластеров по трекам и "шумовой" кластер для остальных точек.

При неизвестном m , благодаря учету пропусков между элементами трека, логарифмическая функция правдоподобия приобретает вид

$$L = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{N_i} e_i(x_k^{(i)}, y_k^{(i)}) + N_0 D + MS \rightarrow \inf, \quad (8)$$

где $(x_k^{(i)}, y_k^{(i)})$, $k = \overline{1, N_i}$ - отсчеты, отнесенные к i -му треку, N_i - их число, N_0 - число шумовых отсчетов, а последний член с вычисляемым заранее S играет роль штрафа за попытку увеличить число треков. Минимизация (8) осуществляется алгоритмом, состоящим из следующих шагов: а) создание новых кластеров, б) МНК-оценка ло-

кальных параметров треков, в) перестройка имеющихся кластеров (путем их разбиения при наличии большого промежутка или слияния, если их можно аппроксимировать одной дугой окружности). Выполнение каждого из этих шагов только в случае уменьшения (8) гарантирует сходимость алгоритма за конечное число шагов.

Алгоритм обобщен на случай предварительного сжатия данных в виде линейных трек-элементов (ЛТЭ) /13/. На основе вышеизложенного подхода с предварительным расположением ЛТЭ в таблице по близости пар и его обобщения на определение близости по тройкам ЛТЭ удалось значительно сократить перебор данных, ускорить вычисление функции правдоподобия и достигнуть скорости обработки в 3-6 с/кадр на реальных изображениях, содержащих до 300 произвольно расположенных ЛТЭ случайной длины, из которых более половины было шумовых. В последнем разделе гл.4 обсуждаются задачи программной реализации алгоритмов фильтрации: наиболее рациональная структура данных, обеспечивающая минимизацию операций над ними, экономная организация модульной иерархической архитектуры программ, принципы распараллеливания глобальных алгоритмов распознавания и разработки быстрых алгоритмов для использования в режиме реального времени и сводка предложенных быстрых алгоритмов.

Пятая глава посвящена проблемам калибровки измерительных приборов, состоящей из следующих этапов обработки данных сканирования эталонной калибровочной решетки: 1) распознавание центров крестов (u_k, v_k) $k = \overline{1, N}$; 2) вычисление калибровочных преобразований (2) и (3); 3) определение характеристик точности и стабильности прибора /4/.

На первом этапе в случае малых дисторсий сканатора предложен метод распознавания сразу всего креста как вырожденной кривой второго порядка, дающий итеративную процедуру вычисления координат центра и их ошибок. В общем случае, когда возможны нелинейные искажения плеч крестов, характерные для приборов, использующих ЭЛТ и электронные усилители света, предложен универсальный метод одновременной робастной полиномиальной подгонки плеч креста, реализованный в виде программы NORTCR, автоматически подбирающей степени полиномов от 1 до 3 для каждого из плеч.

Переходя ко второму этапу, воспользуемся следующим способом представления данных первого этапа, делаем более наглядной постановку задачи. После совмещения начал координат (x, y) и (u, v) и предварительного масштабирования осей (u, v) (для перехода от счетных единиц в мм) отложим в каждом узле решетки перпендикулярно к ней вектор $dx_k = \sqrt{dx_k^2 + dy_k^2}$ с компонентами $dx_k = x_k - u_k$,

$dy_k = y_k - v_k$; $k = \overline{1, N}$ и натянем на эти векторы поверхность.

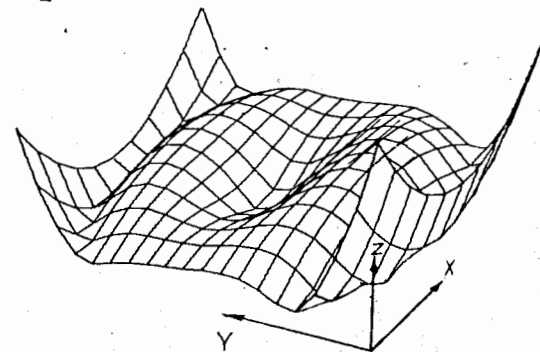


Рис.3.

Пример подобной поверхности для автомата АЭЛТ-2/160 приведен на рис.3. Если откладывать вместо dx_k сначала dx_k , а потом dy_k , то мы получим аналогичные поверхности, к аппроксимации которых и сводится задача получения преобразования (2). Исторически сложившаяся традиция решать эти задачи путем подгонки двумерных полиномов, идет еще с того времени, когда сравнительно небольшой объем памяти ЭВМ препятствовал размещению таблиц из десятков тыс. коэффициентов, требуемых для более быстрых интерполяционных методов. Применялись более простые в вычислении неортогональные системы полиномов, что вело к необходимости использования алгоритмов с удвоенной точностью.

Анализ методологических и вычислительных проблем калибровки, проведенной на большом статистическом материале, позволил автору предложить для приборов с прямоугольной системой координат аппроксимацию (4) с помощью системы $\{\varphi_{(2)}^{(2)}(x, y)\}$ двумерных полиномов, ортогональных на единичном квадрате, для прямого преобразования, и систему $\{\varphi_{(3)}^{(3)}(x, y)\}$, ортогональную на фиксированном множестве точек (x_k, y_k) $k = \overline{1, N}$, - для обратного. Для вычисления коэффициентов полиномов системы $\{\varphi_{(2)}^{(2)}(x, y)\}$ была разработана программа на символьном языке REDUCE-2 /35/. Кроме этого, было проведено исследование интерполяционных методов калибровки и комбинированного метода, состоящего в проведении более простой аппроксимации полиномом третьей степени с последующей быстрой линейной интерполяцией по карте остатков. Последний метод оказался оптимальным с точки зрения ресурсов мини-ЭВМ СМ-4, управляющей автоматом АЭЛТ-2/160, что позволило внедрить

речь быстрый вариант калибровочной программы для проведения оперативных калибровок автомата^{/36/}.

Для приборов типа СИ, использующих, наряду с декартовой, полярную систему координат (R, θ) разработана калибровочная процедура, в которой на основе данных сканирования дополнительного эталона в виде прямой линии приводится предварительная угловая коррекция нелинейных искажений, что существенно упрощает последующую нелинейную аппроксимацию угловой координаты

$$\theta_{\text{корр}} = \theta_0 + \alpha R + \beta/R + \gamma f(R), \quad (9)$$

где для СИ ОИЯИ $f(R) = R/(1 + \sigma(R - R_m)^2)$, σ и R_m - заранее подобранные константы. Показано, что линеаризация (9) приводит к разложению вида (4) по нелинейным функциям $\psi(R, \theta)$, повышающему точность калибровочного преобразования, т.к. позволяет учесть корреляцию между измерениями^{/4/}.

На третьем этапе вычисления точностных характеристик были предложены и обоснованы эффективные критерии стабильности прибора и качества калибровки. Исследования показали необходимость учета статистического вклада квадратов невязок \hat{a}_x^2 и \hat{a}_y^2 каждого креста (т.е. их взвешенной суммы) как локальной характеристики точности, а в качестве общей характеристики - среднеквадратичный взвешенный разброс, вычисляемый как $\hat{\sigma} = \sqrt{\chi_{\min}^2/(N-m)}$. На основе этих характеристик на статистическом материале для разных измерительных приборов был приведен выбор оптимальной степени m аппроксимирующего полинома в зависимости от типа прибора. В конце гл.5 приведены некоторые характеристики универсальных калибровочных программ SENSAL и CALORT для приборов с ортогональным сканированием и программы CALIBR для СИ ОИЯИ, введенных в эксплуатацию как часть матобеспечения реально действующих измерительных систем. На основе программы CALIBR разработан пакет прикладных программ, позволяющий быструю динамичную сборку требуемой версии программы из библиотечных или вновь созданных модулей.

Шестая глава посвящена вопросам автоматизации измерений ионизационной плотности трека, которые в некоторых диапазонах энергий исследуемых частиц могут оказаться решающими при идентификации каналов реакции. С помощью вышеописанной модели стримерного трека были исследованы возможности применения методов оценки ионизации, известных из फिल्मовой обработки^{/15/}. В связи с недостаточной их достоверностью особенно в применении к условиям бесфилмового съема проведено теоретическое исследование свойств статистических оценок, обуславливаемых слиянием стримеров в сгустки с возможным пропаданием

изображений отдельных стримеров^{/37/}. Для получения теоретически обоснованных оценок плотности следовало установить соответствие ионизационной плотности g и распределения длин сгустков и просветом между ними. Полученные формулы носили приближенный характер и действовали только для треков малой плотности, однако благодаря переводу этих задач в терминологию систем массового обслуживания с бесконечным числом каналов ($СМО/\infty$), в диссертации получены их общие решения в аналитическом виде или в приближенной форме, удобной для вычислений на ЭВМ^{/11/}.

В терминах $СМО/\infty$ длина V сгустка стримеров получает толкование как период занятости $СМО$, длина промежутка L - период ее простоя, число стримеров в сгустке ν - число требований, поступивших за период занятости V . Для получения общих результатов, применимых к пузырьковым и стримерным камерам как к частным случаям, естественно было рассматривать общий случай $СМО/\infty$ с произвольным входным потоком и произвольным временем обслуживания.

На основе теории рекуррентных по Феллеру событий в диссертации развиты новые методы изучения $СМО/\infty$, позволившие получить новые, более простые доказательства теорем о времени простоя и занятости общих $СМО/\infty$ ^{/38/}.

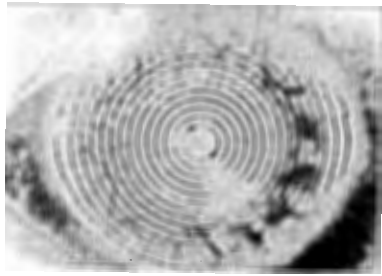
Исследование случайных явлений, возникающих при оцифровке изображений стримерных треков, потребовало новых постановок и доказательств теорем о дискретных $СМО/\infty$ ^{/39/}.

Полученные теоретические распределения позволили построить требуемые оценки ионизационной плотности стримерных и пузырьковых треков при различных методах съема данных (фильмовом и бесфильмовом) с дискриминацией сигнала на два и более уровней, при различной частоте сканирования, в том числе и при сканировании щелью^{/16, 17, 40/}.

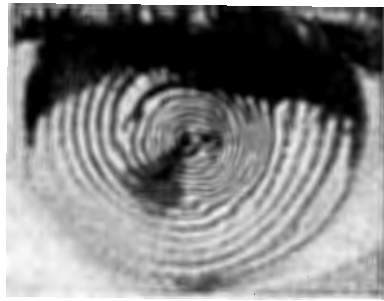
Получены также асимптотические формулы, полезные при практических расчетах ионизации для почти сплошных треков^{/11/}.

Алгоритмы, разработанные для проверки предложенных теоретических оценок при фильмовом съеме, были реализованы в виде программ подсчета ионизации и применены к реальным и, главным образом, модельным данным, показав приемлемую эффективность (относительная ошибка 5-8%). Для программы, подсчитывающей ионизацию треков при полутонных измерениях, разработана версия, ориентированная на параллельные вычисления на матричном процессоре типа ЕС-2706^{/17/}.

Методы, развитые для $СМО/\infty$, были с успехом использованы в прикладной задаче по расчету рабочих параметров измерителя средней частоты импульсов, получаемых с детектора радиоактивного излучения^{/41/}, а также позволили получить новые результаты в теории счетчиков с продлевающимся мертвым временем, относящиеся к точным и асимптоти-



a

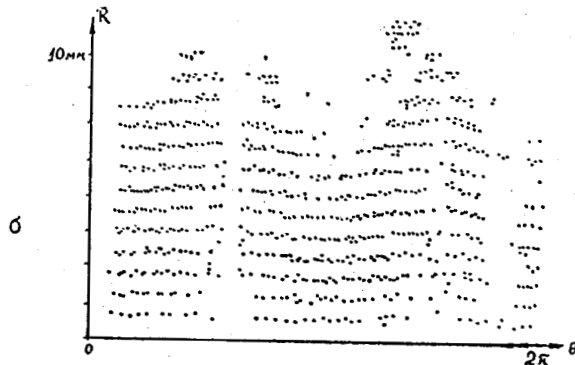


б

Рис. 4



a



б

Рис. 5

ческим распределениям потерь в непрерывном и дискретном случаях^{/42/}.

Назначение седьмой главы – проиллюстрировать возможности развитых в диссертации методов измерений и первичного анализа на примере их применения к решению важной и актуальной задачи по обработке медицинской графической информации, получаемой при фотографировании роговицы глаза человека с целью разработки оптимальной конструкции контактных линз. Такое фотографирование с нанесением на изображение роговицы специальных кольцевых реперных меток (рис.4) производится с помощью прибора – фотокератометра^{/43/}, разработанного во Всесоюзном центре контактной коррекции зрения при НИИ глазных болезней им.Гельмгольца. Необходимость в массовой обработке таких снимков – фотокератограмм (сотни тыс. в год) побудила автора исследовать возможность применения к их обработке созданных в ОИЯИ измерительных автоматов АЭЛТ-1 и АЭЛТ-2/160.^{/5/}.

Используя кольцевой характер штрихового изображения на фотокератограммах (рис.5а), с помощью алгоритма подгонки окружности определяется центр изображения, принимаемый за полюс полярной системы координат, перевод в которую преобразовывал все кольцевые линии в набор волнообразных кривых с примерно совпадающими экстремумами (рис.5б). Для распознавания отдельных линий была применена хорошо отработанная методика выделения линейных элементов. Каждая линия заменялась на 12 линейных элементов, по которым подгонялась по МНК аппроксимирующая кривая вида

$$R = R_0 + (A\theta + B)\sin 2\theta + (C\theta + D)\cos 2\theta ,$$

позволившая проинтерполировать разрывы, вычислить положение главных диаметров и после возврата в исходную декартову систему координат получить координаты искомых точек пересечения колец с главными диаметрами с требуемой точностью (~ 5 мкм) уже при 256 скан-линиях/кадр.

Автоматизированная обработка проводилась на небольшой статистике, т.к. носила методический характер и была предназначена для отработки алгоритмов распознавания, оперативного определения точностных характеристик измерений, сравнительной оценки потребных ресурсов ЭВМ и других затрат на массовую обработку, а также позволяла наметить дальнейшие направления исследований.

Были получены точностные характеристики метода фотокератометрии на основе оценки основных погрешностей отечественного фотокератометра ФК-1, что позволило предложить общую математическую модель поверхности роговицы, хорошо аппроксимирующую различные типы роговиц^{/43/}.

Для определения оптимальной конструкции контактных линз требовалось также решить такие сложные проблемы, как гидродинамические расчеты поведения слезной жидкости под линзой, ее устойчивость при моргании и др., которые выходят за рамки настоящей диссертации и в ней не используются.

Предложенные математические методы, проведенные точностные оценки и качественные расчеты были применены при разработке в НИИ им. Гельмгольца типовых наборов линз, пригодных для большинства пациентов, а также дали возможность автору совместно с разработчиками из НИИ им. Гельмгольца и ОИЯИ предложить электронный измерительный прибор - телекаратомер^{/44/}, в котором изображения кольцевых меток проектируются не на фотопленку, а на телекамеру на базе матрицы или линейки ПЗС, разрешающая способность которых (10^{-2} мм) обеспечивает необходимую точность. Прибор предназначен для автоматического оперативного получения геометрических характеристик глазной роговицы, для чего он оснащен вычислительным устройством. Заявка на изобретение прибора защищена авторским свидетельством^{/44/}.

В приложениях приведены тексты последних версий наиболее употребительных программ случайных чисел для микро-ЭВМ, быстрой подгонки окружности и REDUCE - программа для получения двумерных ортогональных полиномов, а также акты о внедрении и применении, результатов диссертации.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. В диссертации проведено широкое комплексное исследование проблем автоматизации процессов измерения и обработки изображений событий в экспериментах с оптическими трековыми детекторами ядерной физики. Для преодоления разнотипности известных идей и методов математического обеспечения разнообразных измерительных автоматов, затрудняющей их адаптацию на другие виды экспериментов, приборов и ЭВМ, на основе систематического применения вероятностных подходов создан общий математический аппарат, обеспечивающий автоматизацию измерений и распознавания изображений в ядерной физике с помощью полной системы универсальных математических методов и алгоритмов.

2. Разработанный математический аппарат и методика исследований, предложенные в диссертации, дали возможность создать и внедрить программные системы и комплексы, ставшие основными компонентами для таких автоматизированных измерительных систем ОИЯИ и других физических и научных центров, как автоматы "Спиральный измеритель" и АЭЛТ-2/160, система просмотрово-измерительных столов БПС-2 в ОИЯИ, автомат Spiral Reader в ЦЕРНе, что позволило получить новые

физические результаты. Свидетельством общности и эффективности разработанных в диссертации методов явилось их приложение к разработке медицинской измерительной системы для автоматического оперативного получения геометрических характеристик глазной роговицы.

3. Кроме того, в процессе решения основных задач был получен ряд новых важных математических результатов, имеющих самостоятельное научное значение. Сюда относятся: получение и обоснование новых методов робастного оценивания регрессионных параметров; общие алгоритмы распознавания штриховой информации в модели, учитывающей сильное равномерное загрязнение изображения; доказательство теорем о распределении основных характеристик общих систем массового обслуживания с бесконечным числом каналов; ряд быстрых аппроксимационных алгоритмов, а также реализация некоторых алгоритмов распознавания на ЭВМ параллельного действия.

Результаты диссертации отражены в следующих основных публикациях:

1. Никитин В.А., Ососков Г.А. Автоматизация измерений и обработки данных физического эксперимента. Изд. Московского ун-та, М., 1986, 185 с.
2. Bajla I., Ososkov G.A., Turzova M. An approach to video data compression for on-line image processing in high energy physics. Comp. and Artif. Intelligence, v.3, No.6, 1984, pp. 527-538; v.4, No.1, 1985, pp. 45-57.
3. Ососков Г.А. Применение методов распознавания образов в физике высоких энергий. Лекции для молодых ученых, вып.26, ОИЯИ, РИО-83-187, Дубна, 1983.
4. Богданова Н.Б., Гаджиков В.И., Ососков Г.А. Математические проблемы калибровки автоматизированных систем измерения данных оптических трековых детекторов в физике высоких энергий. ЭЧАЯ, т.17, вып.5, 1986, с.982-1029.
5. Ососков Г.А. Использование методов статистических испытаний для решения задач ядерной физики в вычислительном центре ОИЯИ. В кн.: Материалы Совещания по матем. методам решения задач ядерной физики. ОИЯИ, 2005, Дубна, 1965, с.105-117.
6. Ososkov G.A. COPLAN - a Language for on-line Control Programs. CERN/D. Ph. II/Prog. 70-6, Geneva, 1970.
7. Ososkov G.A. The Spiral Reader Status and Command Register Test Program. CERN/D. Ph. II/Prog. 69-6, Geneva, 1969.
8. Ососков Г.А. Математическое моделирование треков при спиральном сканировании. ОИЯИ, РИИ-4463, Дубна, 1969.

9. Крушински Д., Ососков Г.А., Турзова М. Быстрые алгоритмы и спец-процессор сжатия для систем бесфильмового съема трековой информации. В кн.: Труды У Межд.Совещ. по проблемам матем. моделирования, программирования и матем. методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10,10-84-818, Дубна, 1984, с.343-345.
10. Ososkov G.A., Vajtersic M. A fast parallel algorithm for the recognition of ionized particle tracks. Proc. in comp. stat. 6th symp., Vienna, Phys.-Verlag G.m.B.H., 1984, p.301-307.
11. Двуреченский А., Ососков Г.А. О предельных свойствах обобщенной системы массового обслуживания с бесконечным числом каналов. Изв. АН СССР. Техн.киберн., № 4, 1985, с.60-64.
12. Иоселиани Ц.И., Ососков Г.А., Чернов Н.И., Шандрикова Е. Статистический подход в задаче распознавания образов в физике высоких энергий. Точечная модель изображения треков. ОИЯИ, Р10-86-666, Дубна, 1986.
13. Ососков Г.А., Чернов Н.И. Статистический подход в задаче распознавания образов в физике высоких энергий. Реконструкция треков по сжатым данным. ОИЯИ, Р10-86-773, Дубна, 1986.
14. Арешидзе Г.Г., Иоселиани Ц.И., Ососков Г.А. Моделирование измерений реперных крестов при спиральном сканировании. Труды ТГУ, физика, т.208, вып.7, Тбилиси, 1979, с.57-63.
15. Кадыков Г.М., Ляйсте В., Ососков Г.А. Имитационное моделирование треков в стримерной камере для выбора метода оценки плотности следов. В кн.: Совещание по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974, с.51-59.
16. Двуреченский А., Кулюкина Л.А., Ососков Г.А. О некоторых статистических оценках ионизации стримерных камер. В кн.: Труды У межд. совещания ... ОИЯИ, Д10,11-84-818, Дубна, 1984, с.343-345.
17. Кулюкина Л.А., Ососков Г.А., Халада Л. Алгоритмы автоматического подсчета ионизации стримерных треков при полутонных измерениях. ОИЯИ, Р11-86-342, Дубна, 1986.
18. Байла И., Ососков Г.А. К вопросу о вычислении быстрого слэнт-преобразования. Автометрия, № 5, 1982, с.16-22.
19. Ососков Г.А. Расчет параметров промежуточной памяти в системе регистрации случайных сигналов. Тезисы кр. научн. сообщ.Межд. конгресса математиков (Москва-1966), секция II, М., Мир, 1966,с.45.
20. Григорян К.В., Нанасян А.С., Ососков Г.А. Моделирование системы реального времени на языке Симула-67.ОИЯИ, 10-10059, Дубна, 1976.
21. Ососков Г.А. Методика моделирования случайных чисел на электронных цифровых машинах. Вопр. радиоэлектроники, сер.ХП, вып.13, 1959, с.52-66.
22. Ососков Г.А., Войкова Т. Методы генерации и тестовой проверки случайных чисел на ЭВМ. В кн.: Совещание по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974, с.169-178.
23. Ососков Г.А. Моделирование случайных величин на электронных цифровых машинах. В сб.: Материалы совещания по матем.методам решения задач ядерной физики. ОИЯИ, 5-3263, Дубна, 1967,с.28-32.
24. Ососков Г.А. Генерирование на ЭВМ случайных чисел с показательным распределением. ЖВМ и МФ, т.7, вып.3, 1967, с.710-713.
25. Ососков Г.А. Быстрый способ получения случайной последовательности с пуассоновым законом распределения. ЖВМ и МФ, т.17, вып.4, 1976, с.1052-1053.
26. Бабаян Г.Е., Ососков Г.А. Транслятор с языка FORTRAN в машинный код ЭВМ типа "Электроника-100". ОИЯИ, 11-9766, Дубна, 1976.
27. Бабаян Г.Е., Ососков Г.А. Описание специализированного языка FORTRAN , предназначенного для автоматизации программирования на управляющих мини-ЭВМ. ОИЯИ, 10-9768, Дубна, 1976.
28. Бабаян Г.Е., Зверев А.М., Можаров Ю.П., Ососков Г.А. Исследование по применению языка FORTRAN для разработки программ управления автоматом НРД с помощью ЭВМ PDP-9. ЕФИ-228(21), Ереван, 1977.
29. Бабаян Г.Е., Зверев А.М., Ососков Г.А. Компилятор со специализированного языка FORTRAN в макро-язык ЭВМ PDP-9. ЕФИ-227(20), Ереван, 1977.
30. Нергуй В., Ососков Г.А. Основные алгоритмы и структура программы ФИЛЬТР. ОИЯИ, Р10-83-612, Дубна, 1983.
31. Астапов А.А., Бородюк В.П., Куняев С.Е., Ососков Г.А., Чернов Н.И. Численный анализ робастных регрессионных методов. ОИЯИ, Р5-85-492, Дубна, 1985.
32. Chernov N.I., Ososkov G.A. Joint robust estimates of location and scale parameters. JINR, E10-86-282, Dubna, 1986.
33. Куняев С.В., Ососков Г.А., Чернов Н.И. Статистические методы распознавания и робастного оценивания параметров треков. ОИЯИ, Р10-84-553, Дубна, 1984.
34. Ososkov G.A. Pseudo-random number generators for microcomputers. Proc. of 6th Intern. Symposium: Mini- and microcomputers and their applications, Budapest, 1980, p.345-349.
35. Байла И., Ососков Г.А. Математические вопросы обработки калибровочных измерений. В сб. научных работ ОИЯИ и ЦИФИ, т.3, КФКИ - 1979-82, Будапешт, 1979, с.47-59.
36. Куняев С.В., Ососков Г.А., Семейкин А.Я. О комбинированном методе калибровки измерительных приборов. ОИЯИ, Р10-86-471, Дубна, 1986.

37. Двуреченский А., Кулюкина Л.А., Ососков Г.А. Об оценке плотности следов в трековых камерах. ОИЯИ, 5-81-362, Дубна, 1981.
38. Двуреченский А., Кулюкина Л.А., Ососков Г.А. О применении систем массового обслуживания с бесконечным числом каналов к некоторым задачам физики высоких энергий. ОИЯИ, P5-82-682, Дубна, 1982.
39. Dvurecenskij A., Kulyukina L.A., Ososkov G.A. On a problem of the busy-period determination in queues with infinitely many servers. J. Appl. Prob., v.21, 1984, pp.201-206.
40. Иоселиани Ц.И., Ососков Г.А., Пазман А. Использование τ - критерия для определения относительной плотности треков при спиральном сканировании. В кн.: Совещание по программированию и матем. методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974, с.184-187.
41. Ванков И., Двуреченский А., Ососков Г.А. О приложении теории рекуррентных событий к одной задаче ядерной электроники. ОИЯИ, 10-82-574, Дубна, 1982.
42. Dvurecenskij A., Ososkov G.A., On a modified counter with prolonging dead time. J. Appl. Prob., v.22, 1985, pp.678-687.
43. Kivayev A.A., Ososkov G.A., Shapiro E.I. Cornea topography investigation and principles of the contact lens design on the basis of keratometry. The Contact Lens J., v.13, No.8, 1985, pp. 3-17.
44. Киваев А.А., Элькинд С.А., Карпов А.В., Ососков Г.А., Приходько В.И., Завьялов В.Ф. Кератометр. Авторское свидетельство СССР №1101772. Оpubл. в О.И. №25 1984 г., с.125.
45. Байла И., Баранчук М.К., Барашенкова Н.В., Лапчик Э.Д., Ососков Г.А., Шкунденков В.Н. Точностные характеристики сканирующего автомата АЭЛТ-2/160. ОИЯИ, P10-12990, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 февраля 1987 года.