

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 539.1.08+681.3.06

4-89-242

**МОЙСЕНЗ**

**Петр Владимирович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОННЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
СЕКЦИОННОГО ТИПА  
В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**Специальность 05.13.16 - применение  
вычислительной техники,  
математического моделирования  
и математических методов в научных исследованиях**

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

**Дубна 1989**

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук

Иванченко  
Иосиф Моисеевич

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
профессор

Днестровский  
Юрий Николаевич  
Ажгирей  
Леонид Степанович

доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Ленинградский институт ядерной физики  
им. Б.П. Константинова АН СССР.

Защита состоится *"5 октября"* 1989 г.  
в *10.30* часов на заседании специализированного совета Д 047.01.04  
Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, г. Дубна  
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.  
Автореферат разослан *"21 августа"* 1989 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

*Иванченко* Иванченко З.М.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсификация научных исследований, усложнение процессов регистрации и анализа данных в физике высоких энергий приводят к необходимости разработки комплексного математического аппарата и созданию в условиях многостороннего сотрудничества мобильного программного продукта, обеспечивающего эффективную (с точки зрения временных затрат, свойств статистических оценок необходимых параметров, объема требуемых ресурсов ЭВМ) обработку и анализ данных с трековых детекторов. В современных экспериментах широко используются электронные трековые детекторы секционного типа в аксиально-симметричном магнитном поле, например, для регистрации и изучения мюонной компоненты нейтринных взаимодействий. По сложности решаемых задач, составу электронного оборудования подобные детекторы являются либо самостоятельными установками, либо частью крупномасштабных экспериментальных систем. Анализ планируемых экспериментов позволяет утверждать, что эти детекторы найдут применение и на ускорителях нового поколения. Следует особо подчеркнуть, что подобные детекторы являются многокомпонентными и дорогостоящими системами, обычно создаваемыми на основе международного сотрудничества научных центров, часто значительно удаленных друг от друга, использующих ЭВМ существенно разных типов для обработки экспериментальных данных.

Работы, положенные в основу диссертации, выполнены в соответствии с проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ и международного сотрудничества ОИЯИ.

Цель работы заключалась в разработке математических алгоритмов для обработки экспериментальных данных, регистрируемых электронными трековыми детекторами секционного типа в аксиально-симметричном магнитном поле, и создании на основе этих разработок программного обеспечения мюонного спектрометра установки "Нейтринный детектор".

Научная новизна работы. Впервые разработан комплексный математический аппарат для определения характеристик координатных детекторов, геометрической и кинематической реконструкции траекторий. Предложен новый алгоритм вычисления состоятельных оценок характеристик дрейфовых камер (параметры передаточной

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

функции, параметры локальных систем координат, эффективность и точность). Разработаны оригинальные методы распознавания траекторий заряженных частиц в аксиально-симметричном магнитном поле в условиях временной мультивариантности. Предложены методы распознавания прямолинейных траекторий с использованием параллельных процессоров. На базе современных, взаимодополняющих методов разработано новое эффективное решение задачи восстановления параметров траекторий.

Предложены и реализованы инструментальные средства создания мобильных программных комплексов в условиях распределенной разработки.

На базе вычислительного комплекса, включающего микро-ЭВМ и большие вычислительные машины, создана графическая система для визуальной идентификации и отбора событий.

Практическая значимость работы. На основе разработанного математического аппарата создано программное обеспечение для обработки и экспресс-анализа данных с мюонного спектрометра установки "Нейтринный детектор". Разработаны программы для проведения методических исследований дрейфовых камер, для контроля и обработки экспериментальных данных с установки БИС-2. Применение созданного программного обеспечения позволило получить целый ряд важных научно-методических и физических результатов. Программное обеспечение адаптировано на ЭВМ ЦВК ОИЯИ, ИФВЭ (Серпухов), ИФВЭ (Цойтен, ГДР), ЦИФИ (Будапешт, ВНР). Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах на новом поколении ускорителей.

Апробация работы. Результаты, положенные в основу диссертации, докладывались автором на У Международном совещании по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач (г. Дубна, 1983г), на IУ-X рабочих совещаниях по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ (1983-1989 гг), обсуждались на научных семинарах ЛВТА, ЛЯП, ЛВЭ и ОНМО ОИЯИ (1983-1989 гг).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах /1-13/.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные задачи и особенности их решения, дано сжатое содержание по главам.

В первой главе дан краткий обзор современных детекторов секционного типа, приводятся информационные возможности и технические характеристики нейтринного детектора ИФВЭ-ОИЯИ, определены основные задачи комплекса программ GRAND для обработки экспериментальных данных.

В рамках сотрудничества для обработки экспериментальных данных используются различные ЭВМ, поэтому вопросам гибкости и адаптивности программы GRAND уделялось серьезное внимание. Для достижения указанных целей применяются различные методы, подразделяемые на два уровня. К первому относятся методы макрорегенерации, условной трансляции и т.п., позволяющие учесть многовариантность программного обеспечения, распределенность разработок программ. В качестве базового средства автоматизации программирования использована мобильная программа PASCAL. Ко второму уровню обеспечения адаптивности и гибкости относятся средства для динамической настройки программ. В программе GRAND использован пакет FFREAD, опыт его применения в различных ядерно-физических центрах показал его полноту для решаемых задач.

Для управления динамическими структурами данных использован пакет программ ZBOOK, отличающийся высокой степенью совместимости с базовым пакетом программ статистической обработки NBOOK. В качестве языка программирования выбрано подмножество Фортрана.

Вторая глава посвящена математическим методам определения характеристик дрейфовых камер (ДК). Использование ДК в экспериментальных установках требует нахождения передаточной функции

$$X = P + s \cdot f(t), \quad (I)$$

где P - положение сигнальной проволоки в некоторой декартовой системе координат  $koz$ ,

v - направление дрейфа ( $\pm I$ ) (от точки прохождения частицы до сигнальной проволоки),

$f(t)$  - преобразование (вообще говоря нелинейное) от времени дрейфа  $t$  к расстоянию до сигнальной проволоки.

Существующие методы нахождения преобразования (I) можно

разбить на два класса:

- с использованием "эталонного" прибора,
- без использования "эталонного" прибора.

Первый подход был реализован в методических исследованиях первых ДК на синхрофазотроне ОИЯИ, где набор пропорциональных камер служил для определения параметров траекторий. На большей части дрейфового промежутка передаточную функцию можно представить в виде:

$$x^i = v^i(t^i - t_0^i) + P_0^i \quad (2)$$

Параметры  $v^i$ ,  $P_0^i$  находятся из итерационного процесса

$$x_{Д}^i(k) = a_i(v^i)^{i(k-1)} \cdot (t^i(k) - t_0^i) + P_0^i(k-1) + b_i$$

$$v^i(k) = a_i v^i(k-1), P_0^i(k) = a_i P_0^i(k-1) + b_i$$

Вспомогательные параметры  $a_i, b_i$  находятся из условия минимума функционала

$$\Phi^i(k) = \sum_{j=1}^{L_{ik}} (x_{Пj}^i(k) - x_{Дj}^i(k))^2$$

Здесь  $k$  - номер итерации,  $i$  - номер проволоки,  $j$  - номер точки, вошедшей в итерацию,  $L_{ik}$  - количество этих точек. Индекс  $k$  у  $x_{Пj}^i, x_{Дj}^i$  означает, что в сумму входят только точки, удовлетворяющие условию близости на  $k$ -й итерации. Параметры  $P_0^i(0), v^i(0)$  берутся из совместного распределения  $x_{Пj}^i, t^i$ . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока  $a_i \approx 1, b_i \approx 0$ . Во всех итерациях, кроме нулевой, участвуют только точки, для которых  $|x_{Пj}^i - x_{Дj}^i| < 2$  мм.

Второй подход был реализован для определения характеристик ДК установки "Нейтринный детектор", которые можно представить в виде набора дрейфовых промежутков (см. рисунок) с четырьмя

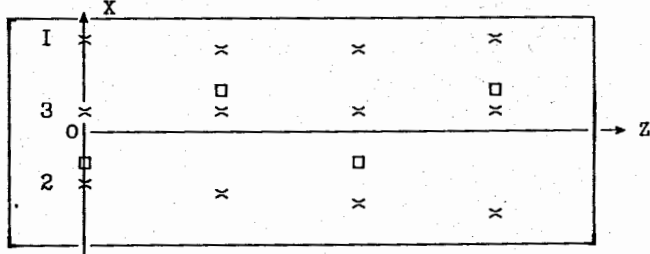


Схема дрейфового промежутка (□ - сигнальные проволоки, x - зарегистрированные координаты стрингов).

сигнальными проволоками, позволяющими восстановить проекцию прямолинейного отрезка трека (стринг). Передаточную функцию каждой сигнальной проволоки можно записать как

$$x = s \cdot v \cdot t + s \cdot R + P,$$

где  $v$  - скорость дрейфа электронов,  $t$  - время дрейфа электронов,  $R$  - смещение оценки  $t$  (пьедестал электроники). Искомые параметры  $v, R$ , с учетом измерительных ошибок, найдем из условия минимума функционала

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^3 (s_{ij} v_i t_{ij} + s_{ij} R_i + P_i - (1-k_i)(s_{1j} v_1 (t_{1j} + \varepsilon_{1j}) + s_{1j} R_1 + P_1) - k_i (s_{4j} v_4 (t_{4j} + \varepsilon_{4j}) + s_{4j} R_4 + P_4))^2 \quad (3)$$

где  $N$  - число зарегистрированных стрингов,  $\varepsilon_1, \varepsilon_4$  - некоррелированные случайные ошибки измерений  $t_1, t_4$  с нулевыми средними и дисперсиями  $D_1, D_4$ ,  $k_i = \frac{Z_i - Z_1}{Z_4 - Z_1}$ ,  $Z_i$  - координата  $i$ -й проволоки.

Включение в функционал (3)  $\varepsilon_1, \varepsilon_4$  является необходимым условием корректного применения метода наименьших квадратов. Игнорирование их приводит к потере свойства состоятельности оценок определяемых параметров. Из условия минимума (3) получим следующую систему уравнений:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 s_{ij} s_{1j} (v_i t_{ij} t_{1j} + R_i t_{1j}) c_{1i} - N v_1 D_1 c_{11} = - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 P_i s_{1j} t_{1j} c_{1i} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 (s_{ij} s_{1j} v_i t_{ij} + s_{ij} s_{1j} R_i) c_{1i} = - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 P_i s_{1j} c_{1i}$$

где  $i=1, 2, 3, 4$ ,  $c_{1i}$  - элементы матрицы  $c$ .

$$c = \begin{pmatrix} -(1-k_2)^2 - (1-k_3)^2 & (1-k_2) & (1-k_3) & -k_2(1-k_2) - k_3(1-k_3) \\ -(1-k_2) & 1 & 0 & -k_2 \\ -(1-k_3) & 0 & 1 & -k_3 \\ -k_2(1-k_2) - k_3(1-k_3) & k_2 & k_3 & -k_2^2 - k_3^2 \end{pmatrix}$$

Следует особо подчеркнуть, что только в случае, когда

$$|N v_1 D_1 c_{11}| \ll \left| \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^4 P_i s_{1j} t_{1j} c_{1i} \right|,$$

поправкой, связанной с дисперсией  $D_1$ , можно пренебречь

(ее неоправданное игнорирование может привести к ошибкам определения скорости дрейфа в десятки процентов).

Предположим, что для каждого  $i$   $v_{ij}$  - константа (физически это означает, что все стринги лежат по одну сторону от сигнальной проволоки). Анализ системы (4) показывает, что в этом случае, только при условии задания одной скорости дрейфа и двух пьедесталов, можно найти все остальные скорости и пьедесталы. Выбрав ансамбль стрингов так, что  $v_{ij}^1 v_{1j}$ -константы (на рисунке подобные стринги отмечены цифрами 1 и 2), можно найти все скорости дрейфа (без априорного задания одной из них). Дополнив этот ансамбль стрингами, для которых  $v_{ij}$ -константы, а  $v_{ij}^1 v_{1j}$  не совпадают с предыдущими (на рисунке подобные стринги отмечены цифрой 3), удастся найти и все пьедесталы (без априорного задания двух из них). Отметим, что определение параметров передаточных функций возможно при условии, что все  $P_i$ -различны, а дисперсии времен дрейфа каждой камеры ненулевые. Таким образом, впервые показано, что ансамбль стрингов, выбранный специальным образом, позволяет определить абсолютную систему координат дрейфовых камер.

Следует отметить, что полученные результаты применимы для любого числа сигнальных проволок  $m$ . Для этого в системе (4)

$\sum_{i=1}^4$  необходимо заменить на  $\sum_{i=1}^m$ , а матрицу  $c$  на

$$c = \begin{pmatrix} -\sum_{i=2}^{m-1} (1-k_i)^2, (1-k_2), (1-k_3), \dots, (1-k_{m-1}), -\sum_{i=2}^{m-1} k_i (1-k_i) \\ -(1-k_2) & 1 & 0 & \dots & 0 & -k_2 \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ -(1-k_{m-1}) & 0 & 0 & \dots & 1 & -k_{m-1} \\ -\sum_{i=2}^{m-1} (1-k_i)k_i, k_2 & k_3 & \dots & k_{m-1} & -\sum_{i=2}^{m-1} k_i^2 \end{pmatrix}$$

Задаче определения параметров локальных систем координат для различных условий экспозиций посвящено множество работ. В дис-

сертации предложен экономичный аппарат определения состоятельных оценок необходимых параметров, характеризуемый отсутствием распространенных упрощений, приводящих к неэффективной процедуре поиска.

Предположим, что задана некоторая декартова система координат XYZ, в которой расположены  $m$  детекторов. С каждым детектором связана локальная система координат  $X_i Y_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), такая, что для плоскости  $X_i O_i Y_i$  угол нутации равен нулю, при этом каждая локальная система координат  $X_i Y_i$  повернута относительно XY на угол  $\alpha_i$ , начало  $O_i$  имеет координаты  $(S_i^x, S_i^y, Z_i)$ . Не ограничивая общности рассуждений, заменим параметры  $Z_i$  на  $k_i$   $\left[ k_i = \frac{Z_i - Z_1}{Z_1 - Z_m} \right]$ .

Параметры  $\alpha_i, S_i^x, S_i^y, k_i$  могут быть найдены из условия минимума функционала

$$\Phi = \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^{m-1} (y_{ij} \cos \alpha_i + x_{ij} \sin \alpha_i + S_i^y - (1-k_i) ((y_{1j} + \epsilon_{1j}^y) \cos \alpha_1 + (x_{1j} + \epsilon_{1j}^x) \cdot \sin \alpha_1 + S_1^y) - k_i ((y_{mj} + \epsilon_{mj}^y) \cos \alpha_m + (x_{mj} + \epsilon_{mj}^x) \sin \alpha_m + S_m^y))^2 + \dots \quad (5)$$

$$+ \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^{m-1} (x_{ij} \cos \alpha_i - y_{ij} \sin \alpha_i + S_i^x - (1-k_i) ((x_{1j} + \epsilon_{1j}^x) \cos \alpha_1 - (y_{1j} + \epsilon_{1j}^y) \cdot \sin \alpha_1 + S_1^x) - k_i ((x_{mj} + \epsilon_{mj}^x) \cos \alpha_m - (y_{mj} + \epsilon_{mj}^y) \sin \alpha_m + S_m^x))^2$$

где  $N$  - количество прямолинейных треков, пересекающих  $m$  локальных систем координат;

$x_{ij}(y_{ij})$  - зарегистрированные координаты ( $j$ -номер трека,  $i$ -номер детектора);

$\epsilon^x(\epsilon^y)$  - случайная ошибка измерения  $X(Y)$  координаты с нулевым средним.

Из условия минимума (5), с учетом малости  $|\alpha_i - \alpha_1|$  и независимости ошибок измерений, получим следующую систему уравнений:

$$\sum_{i=1}^m c_{1i} (\alpha_i - \alpha_1) \left[ \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{1j} x_{ij} + y_{1j} y_{ij} - x_{1k} x_{ij} - y_{1k} y_{ij}) - (\delta_{11} + \delta_{m1}) \cdot (\delta_{1i} + \delta_{mi}) N(N-1) (D_i^x + D_i^y) \right] = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N c_{1i} (x_{ij} y_{1j} - x_{1j} y_{ij} + x_{1k} y_{ij} - x_{ij} y_{1k})$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (x_{ij} \sin \alpha_i + y_{ij} \cos \alpha_i + S_i^y) c_{1i} = 0 \\
& \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (x_{ij} \cos \alpha_i - y_{ij} \sin \alpha_i + S_i^x) c_{1i} = 0 \\
& \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N c_{1i} [(\alpha_i - \alpha_k) (x_{ij} y_{1j} - y_{ij} x_{1j} + y_{ij} x_{1k} - x_{ij} y_{1k}) - (\alpha_i - \alpha_m) \cdot \\
& \quad \cdot (x_{ij} y_{ij} - y_{ij} x_{mj} + y_{ij} x_{mk} - x_{ij} y_{mk})] = \\
& \sum_{i=1}^m c_{1i} [ \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij} x_{1j} + y_{ij} y_{1j} - x_{1k} x_{ij} - y_{1k} y_{ij}) - \delta_{1i}^{N(N-1)} (D_1^x + D_1^y) ] - \\
& - \sum_{i=1}^m c_{1i} [ \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij} x_{mj} + y_{ij} y_{mj} - x_{ij} x_{mk} - y_{ij} y_{mk}) - \delta_{mi}^{N(N-1)} (D_m^x + D_m^y) ] ,
\end{aligned}
\tag{6}$$

где  $D^x$  и  $D^y$  — дисперсии ошибок измерений,  $c_{ij}$  — элементы матрицы  $C$  (см. ранее),  $i=1, 2, \dots, m$ . Первые три уравнения системы (6) соответствуют задаче поиска  $\alpha_i, S_i^x, S_i^y$ . Таким образом, решение этой традиционной задачи, связанное с решением нелинейной системы уравнений, практически свелось к решению линейных систем. На основании анализа системы (6) получено, что для определения углов поворота  $\alpha_i$  необходимо, чтобы один из этих углов был задан, для определения  $S_i^x$  (аналогично  $S_i^y$ ) необходимо задать два из них, для определения  $z_i$  необходимо также задать два из них. Отметим, что определение параметров локальных систем координат возможно при условии, что треки неколлинеарны и дисперсии распределения координат треков в каждом детекторе ненулевые.

Эффективность трековых детекторов можно определить как по совокупности треков, реконструированных на наборе детекторов, так и на множестве фрагментов треков, зарегистрированных отдельным детектором.

Третья глава посвящена распознаванию траекторий. Введем ортогональную декартову систему координат  $XUZ$  такую, что ось  $OZ$  совпадает с осью симметрии магнитного поля. Изучение теоретического материала и результатов моделирования показало, что форма проекций траекторий на плоскости  $XOZ$  и  $YOZ$  в зависимости от

кинематических характеристик меняется от квазипрямолинейной до осциллирующей. При этом часть проекции траектории, регистрируемая тремя-четырьмя соседними камерами и лежащая в положительной либо отрицательной полуплоскостях  $XOZ$  ( $YOZ$ ), хорошо описывается квадратичной параболой. Анализ различных методов распознавания траекторий в двумерной области показал, что комбинаторный и глобальный методы требуют значительных вычислительных затрат, метод опорной полосы неприменим из-за относительной сложности опознаваемого объекта. Наиболее приемлемым из широкого класса рассмотренных методов является вариант метода слежения по треку.

Распознавание треков осуществляется на множестве стрингов, которые в процессе поиска объединяются во фрагменты. Фрагмент — это упорядоченная (по номерам ДК) совокупность стрингов, принадлежащих одной полуплоскости (положительной или отрицательной). При этом ДК представлена во фрагменте не более одного раза. Количество стрингов, образующих фрагмент, должно быть больше или равно заданному числу  $N$ . На множестве стрингов, восстановленных в первых камерах, отыскивается фрагмент, наилучшим образом описываемый по методу наименьших квадратов квадратичной параболой. На основе найденных параметров параболы строится прогнозируемая область в следующей камере, и в этой области отыскивается стринг, являющийся продолжением фрагмента, такой, что фрагмент и найденный стринг наилучшим образом описываются квадратичной параболой. Затем по последним  $N$  стрингам фрагмента строится квадратичная парабола, по параметрам которой конструируется прогнозируемая область в следующей камере, где выбирается стринг по описанной выше процедуре, и т.д. На этапе отыскания фрагмента допускается несрабатывание определенного числа камер. Пороговое значение  $M$  этой величины сильно зависит от эффективности работы камеры. Поиск фрагмента завершается, когда число отсутствующих стрингов превысит  $M$  либо фрагмент выходит за апертуру установки. На этапе отыскания текущего фрагмента стринги, относящиеся к уже найденным фрагментам, не рассматриваются.

После нахождения всех фрагментов производится их объединение в проекции траекторий на плоскости  $XOZ$  исходя из условия близости точек пересечения соответствующих парабол с осью  $OZ$  и производных в этих точках.

На завершающем этапе распознавания производится объединение найденных проекций в пространственные траектории по следующей схеме. Вначале из множества найденных проекций образуются пары исходя из условия близости начал и концов проекций. Затем среди таких пар выбирается пара, наилучшим образом соответствующая целеуказанию (если оно имеется). При необходимости, на последнем шаге производится выбор пары по соответствию траектории законам движения заряженной частицы в магнитном поле кольцевых магнитов.

Безусловно, что предложенная схема, с учетом особенностей эксперимента, претерпевает определенные изменения, например, установка "Нейтринный детектор" характеризуется временной мультивариантностью, высокой множественностью. Успех процедуры распознавания существенно зависит от учета этих особенностей.

В диссертации описан реализованный алгоритм распознавания прямолинейных треков с использованием программируемых трековых процессоров, а также приводится алгоритм поиска прямолинейных треков, основанный на представлении результатов регистрации и всевозможных моделей треков в виде матриц с последующим сравнением полученных матриц на основе возможностей матричного процессора ЕС-2706. Следует отметить, что эффективность применения матричного процессора существенно зависит от сложности восстанавливаемого события и числа обменов с центральной ЭВМ.

Четвертая глава посвящена определению параметров траекторий частиц  $(\vec{X}), (\vec{Y})$ . Вектор параметров  $(R)$  состоит из пяти элементов, где

$r_1$  } - x, y - координаты частицы при фиксированном z (для  
 $r_2$  } определенности z=0);

$r_3$  } - угловые коэффициенты в точке  $(r_1, r_2, z)$ ;  
 $r_4$  }

$r_5$  - значение импульса в точке  $(r_1, r_2, z)$ .

Исходной информацией для определения R служат результаты распознавания траекторий и физические характеристики экспериментального объема. С учетом рационального компромисса между требованиями высокого быстродействия и высокой точности предложено два решения задачи. Первое, основанное на многомерном статистическом анализе, характеризуется тем, что задача

определения R сводится к задачам восстановления регрессий

$$r_1(\vec{X}), r_2(\vec{X}), r_3(\vec{X}), r_4(\vec{X}), r_5(\vec{X}),$$

которые эквивалентны задаче восстановления зависимостей. При этом последовательность пар для восстановления зависимостей

$$R_1, X_1; R_2, X_2; \dots; R_L, X_L \quad (7)$$

получается на основе математического моделирования либо проведения калибровочных экспозиций. Предположим, что размерность вектора  $\vec{X} = N$ , тогда каждый вектор  $\vec{X}$  можно рассматривать как точку в N- мерном пространстве. Прежде чем переходить к решению задачи восстановления зависимости, полезно перейти от  $\vec{X}$  к новым координатам, например, на основе построения M- мерной гиперплоскости на  $\{\vec{X}\} (1, 2, \dots, L)$  так, что  $M \ll N$ . В дальнейшем будем полагать, что (для определенности) необходимо восстановить  $r_5(\vec{X}) = r(\vec{X})$ . Среди разнообразных методов восстановления зависимостей рассмотрим метод, основанный на использовании многочленов Чебышева. Будем реконструировать  $r(\vec{X})$  на выборке (7), в виде

$$\sum_{i=1}^L c_i T_i(\vec{X}), \text{ где}$$

$$T_i(\vec{X}) = T_{i(1)}(x_1) \cdot T_{i(2)}(x_2) \cdot T_{i(3)}(x_3) \cdot \dots \cdot T_{i(N)}(x_N),$$

$T_{i(j)}(x_j)$  - многочлен Чебышева степени i(j),

$c_i$  - константа,

L зависит от условий эксперимента и заданной точности решения.

Набор  $c_i (i=1, 2, \dots, L)$  определяется из условия минимума функционала

$$F(c_1, c_2, \dots, c_L) = \sum_{j=1}^L (r_j - \sum_{i=1}^L c_i T_i(\vec{X}_j))^2 \quad (8)$$

на выборке (7). Таким образом, каждая компонента набора параметров траектории выражается через функции вида

$$\sum c_i T_i(\vec{X}).$$

В принципе исходная задача решена. Для оптимальной организации

вычислительного процесса применяется алгоритм выбора многочленов, вносящих основной вклад в минимизацию (8), позволяющий, без существенной потери точности окончательного результата, сократить число рассматриваемых функций от нескольких десятков тысяч до нескольких десятков. К сожалению, изложенный метод не лишен недостатков, главный из которых состоит в том, что изменения параметров установки требуют, вообще говоря, повторного моделирования и минимизации (8). В случае стабильных параметров простота окончательного результата обеспечивает высокую экономичность программ определения параметров траекторий. Так, среднее время для определения значений импульсов в семь раз меньше по сравнению с обобщенным методом наименьших квадратов. При этом в несколько раз уменьшается требуемый объем оперативной памяти.

Второе решение рассматриваемой задачи основано на обобщенном методе наименьших квадратов. Модель траектории описывается формулами:

$$\begin{aligned} x &= r_1 + r_3 z + \frac{1}{r_5} A_1(z) \\ y &= r_2 + r_4 z + \frac{1}{r_5} A_2(z), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } A_1(z) \equiv \int_{u=0}^{u=z} \int_{v=0}^{v=u} F(v) dv du, \quad A_2(z) \equiv \int_{u=0}^{u=z} \int_{v=0}^{v=u} G(v) dv du,$$

$$F(z) \equiv \frac{f(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/r_5}, \quad G(z) \equiv \frac{g(x', y', B_x, B_y, B_z)}{1 - E(p, z)/r_5},$$

$E(p, z)$  - функция энергетических потерь,  
 $B_x, B_y, B_z$  - компоненты вектора напряженности магнитного поля в точке с координатами  $x, y, z$ ,

$$f(x', y', B_x, B_y, B_z) \equiv \frac{e}{c} (1+x'^2+y'^2)^{1/2} \left[ y' B_z - B_y (1+x'^2) + x' y' B_x \right],$$

$$g(x', y', B_x, B_y, B_z) \equiv \frac{e}{c} (1+x'^2+y'^2)^{1/2} \left[ B_x (1+y'^2) - x' B_z - x' y' B_y \right].$$

Формулы (9) позволяют организовать эффективную итерационную процедуру вычисления  $R$ . При этом начальные оценки  $x', y', B_x, B_y, B_z, r_5$  для вычисления повторных интегралов  $A_1(z)$  и  $A_2(z)$  можно получить, аппроксимируя  $(X), (Y)$ , например, квадратичными параболой. Текущее значение  $R$  вычисляется в результате решения

системы нормальных уравнений:

$$\left[ E^T \cdot D^{-1} (\vec{V}) \cdot E \right] \cdot \vec{R} = E^T \cdot D^{-1} (\vec{V}) \cdot \vec{V}^T, \quad (10)$$

$E$  - структурная матрица, соответствующая системе (9);

$D(V)$  - ковариационная матрица измерения  $\vec{V}$ ;

$$\vec{V} \equiv \vec{X} \cup \vec{Y}.$$

Найденное значение  $R$  используется для уточнения  $A_1(z)$  и  $A_2(z)$ , после чего выполняется следующая итерация и т.д. до достижения необходимой точности определения  $R$ . Очевидны привлекательные стороны описанного метода:

- высокое быстродействие,

- применимость для сложных конфигураций магнитных полей.

Для построения ковариационной матрицы измерений  $(D)$  в диссертации предложен оригинальный подход учета многократного рассеяния на границе рассеивающего слоя. Матрица  $D$  имеет вид:

$$d_{x_n x_m} = \sum_{i=1}^{\min(n,m)} \left( \frac{C_i^{xn} C_i^{xm}}{\cos^2 \varphi_i} K_{\alpha_i \alpha_i} + \frac{C_i^{xn} \cdot C_i^{xm}}{\cos \varphi_i} K_{x_i \alpha_i} + K_{x_i x_i} \right) + \delta_{nm} \cdot D^*$$

$$d_{y_n y_m} = \sum_{i=1}^{\min(n,m)} \left( K_{\varphi_i \varphi_i} C_i^{yn} C_i^{ym} + K_{y_i \varphi_i} (C_i^{yn} + C_i^{ym}) + K_{y_i y_i} \right) + \delta_{nm} \cdot D^*$$

$$d_{x_n y_m} = \sum_{i=1}^{\min(n,m)} (C_i^{ym} K_{x_i \varphi_i} + K_{x_i y_i}),$$

где  $x_n^x(y_n^y)$  - измерение в  $XOZ(XOZ)$  - плоскости после  $n$ -го рассеивающего слоя.

$$C_i^{xn} = \sum_{j=i}^n (L_j + T_j + a_j^x \cdot b_j^x),$$

$j$  - номер рассеивающего слоя,

$L_j$  - расстояние между  $j$ -м и  $j+1$ -м рассеивающими слоями ( $L_n$  - расстояние между  $n$ -м рассеивающим слоем и  $n$ -м детектором)

$T_j$  - толщина рассеивающего слоя;

$a_j^x$  - значение производной от ожидаемой траектории на границе рассеивающего слоя ( $f'(T_j)$ );

$$b_j^x = f(T_j) - f'(T_j) \cdot T_j$$

( $a_n = b_n = T_n = 0$ ),



D\* - дисперсия измерительной погрешности дрейфовой камеры.

K - элементы ковариационной матрицы координатных и угловых (угол наклона, азимутальный угол) смещений.

На основании математического эксперимента показано, что учет  $d_{x_{ny}m}$  в ковариационной матрице измерений не приводит к заметному улучшению точности определения R.

В конце четвертой главы дан анализ разработанного автономного варианта графической системы ИРИС (ИРИС/А), необходимой для обеспечения активной роли физика-экспериментатора в контуре задачи обработки данных. При анализе выводимой графической информации на дисплей используется интерактивный режим работы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построены оригинальные экономичные алгоритмы определения состоятельных оценок характеристик координатных детекторов типа дрейфовых камер (ДК). Теоретически и посредством математического эксперимента обоснованы условия разрешимости этих задач. Впервые показано, что для широкого класса ДК все параметры передаточной функции можно найти без априорного задания части из них.

2. Разработан и программно реализован алгоритм автоматического распознавания набора пространственных траекторий в условиях нелинейных возмущений, высокой множественности, случайного фона и значимой временной мультивариантности. Реализованы алгоритмы распознавания прямолинейных траекторий с использованием возможностей параллельных процессоров.

3. Разработано эффективное решение задачи восстановления параметров траекторий (методом многомерного статистического анализа и обобщенным методом наименьших квадратов), предложен новый алгоритм вычисления вклада многократного кулоновского рассеяния при движении частицы через рассеивающие слои.

4. Создана система визуальной идентификации и отбора экспериментальных событий на основе разработанной графической системы.

5. Создано программное обеспечение для мюонного спектрометра установки "Нейтринный детектор". Эффективность разработанного математического аппарата доказана методом Монте-Карло и подтверждена результатами обработки экспериментальной информации. На основе созданных функциональных модулей на ЭВМ ЕС-1040

подготовлена система экспресс-анализа информации, позволяющая проводить оперативный контроль детекторов мюонного спектрометра и хода эксперимента. Разработаны программы для методических исследований дрейфовых камер, для контроля и обработки экспериментальных данных с многочастичного спектрометра БИС-2.

Применение созданного программного обеспечения позволило получить целый ряд важных научно-методических и физических результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Жигунов В.П.,..., Мойсенз П.В., Пальчик В.В. Общая структура программы GRAND для анализа данных с нейтринного детектора. В кн: Материалы V международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10, II-84-818, Дубна, 1984, с. 318-320.
2. Иванченко И.М., Мойсенз П.В., Программные средства для динамической настройки программ реального времени. ОИЯИ, Б1-10-83-628, Дубна, 1983, 8 с.
3. Говорун Н.Н.,..., Мойсенз П.В., и др. Исследование системы дрейфовых камер на синхрофазотроне ОИЯИ. ОИЯИ, П13-9349, Дубна 1975, 16 с.
- Chernenko S.P.,..., Moisenz P.V., et al. Investigation of a System of Drift Chambers, Nucl. Instr. and Meth. 1976, 138, p.105-110.
4. Гергеи Э.,..., Мойсенз П.В. и др. Математические методы исследования характеристик дрейфовых камер. ОИЯИ, 10-11210, Дубна, 1978 15 с.
5. Иванченко И.М. Мойсенз П.В. Об одном методе определения параметров передаточной функции для дрейфовых камер установки "Нейтринный детектор". ОИЯИ, П10-89-148, Дубна, 1989, 5 с.
6. Вертоградова Ю.Л., Иванченко И.М., Мойсенз П.В. Определение параметров локальных систем координат дискретных детекторов. ОИЯИ, П10-89-149, Дубна, 1989, 9 с.

7. Иванченко И.М., Мойсенз П.В., Рождественский А.М. Распознавание траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора. В кн.: Материалы VIII Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ. ОИЯИ, Д1,2,13-88-90, Дубна, 1988, с.192-196.
8. Арефьев В.А., ..., Мойсенз П.В. и др. Программируемые трековые процессоры в спектрометре БИС-2. ОИЯИ, 13-86-738, Дубна, 1986, 14 с.
9. Иванченко И.М., Мойсенз П.В. Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора методом обучающей статистической выборки. В кн.: Материалы VIII Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ. ОИЯИ, Д1,2,13-88-90, Дубна, 1988, с. 187-191.
10. Иванченко И.М., Мойсенз П.В., Рождественский А.М. Определение параметров траекторий в мюонном спектрометре нейтринного детектора обобщенным методом наименьших квадратов. В кн.: Материалы VIII Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФВЭ-ОИЯИ. ОИЯИ, Д1,2,13-88-90, Дубна, 1988, с. 197-203.
11. Бонюшкина А.Ю., ..., Мойсенз П.В. и др. Графическая система ИГИС. Интегрированный комплекс проблемно-ориентированных пакетов программ интерактивной иллюстративной графики. ОИЯИ, Б1-10-88-889, Дубна, 1988, 51 с.
12. Говорун Н.Н., ..., Мойсенз П.В. и др. Структура программного обеспечения машинной графики для физических экспериментов на линии с ЭВМ. ОИЯИ, 10-82-482, Дубна, 1982, 8 с.
13. Говорун Н.Н., ..., Мойсенз П.В., Пальчик В.В. Архитектура программного обеспечения машинной графики в двухуровневой системе управления экспериментом в области физики высоких энергий. В кн.: Материалы V международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10,11-84-818, Дубна, 1984, с. 70-79.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 апреля 1989 года.