

ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

10-99-99

На правах рукописи

Бар

Б-241

БАРАННИКОВА
Ольга Юрьевна

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА
И БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ С 4 π -ГЕОМЕТРИЕЙ

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

Иваново 1999

Общая характеристика работы

Работа выполнена в Ивановском государственном университете (г.Иваново) и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Г. А. Ососков

Ю. А. Панебратцев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ф. Н. Ясинский

Н. Ю. Кульман

Ведущее научное учреждение:

Петербургский институт ядерной физики РАН
им. Б. П. Константинова (г. Санкт-Петербург)

Автореферат разослан " 19 " апрель 1999 г.

Защита диссертации состоится 27 мая 1999 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета К 063.84.06 при Ивановском государственном университете по адресу: г. Иваново, ул. Ермака, д.37, ИвГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИвГУ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В. М. Озерова

Актуальность проблемы.

Среди аппроксимационных приложений в физике одними из наиболее актуальных являются задачи геометрической калибровки детектирующих устройств на основе реально снимаемых в эксперименте данных и установления связи между различными системами координат, в которых ведутся измерения. По существу все эти задачи состоят в определении корректных преобразований координат при переходе из одной системы в другую. Процедура калибровки измерительной системы является очень важным этапом предварительной обработки данных. Современные детектирующие устройства позволяют определить координату точки взаимодействия с очень высокой точностью (порядка $10 - 25 \mu m$), при этом можно обеспечить только достаточно ограниченную точность самой сборки детектирующего устройства (до $100 \mu m$) и еще меньшую точность (порядка нескольких миллиметров) при относительном позиционировании различных детекторов многокомпонентных экспериментальных установок, используемых в настоящее время для исследований в различных областях физики элементарных частиц. Даже на самых современных экспериментальных установках недостаточное качество геометрической калибровки (или ее отсутствие) может привести к недопустимым ошибкам уже на этапе предварительной обработки данных при преобразовании информации, снимаемой непосредственно с детекторов, в наборы координат, подлежащие дальнейшей обработке в целях получения информации о параметрах треков частиц, их импульсах, распознавания первичной вершины и т. п. В настоящее время увеличение потока данных, требующих обработки в on-line режиме, приводит к необходимости сжатия данных, несмотря на увеличение быстродействия ЭВМ. Поэтому хранение координат точек взаимодействия частиц с детекторами в удобной для последующей обработки унифицированной системе координат, вместо разнородных единиц отсчета различных детекторов, требует высокой точности в определении параметров калибровочных преобразований. Решение калибровочных задач требует многочисленных переопределений параметров траекторий и координат точек взаимодействия. Для того, чтобы иметь возможность периодического переопределения калибровочных параметров (которые могут существенно изменяться в ходе эксперимента, что связано с воздействием магнитных полей, высоких температур и пр.), необходимо максимально сократить машинное время, затрачиваемое на решение калибровочной задачи. Поэтому вместе с задачами калибровки всегда выступают задачи быстрого реконструирования событий, при этом алгоритмы реконструирования должны быть робастными (помехоустойчивыми). Разработанные в данной работе алгоритмы отвечают всем этим требованиям.



Цель работы.

Основная цель данной работы - разработка принципов и алгоритмов геометрической калибровки современных многокомпонентных детекторных установок, и, в частности, алгоритмов, позволяющих проводить локальную и глобальную геометрическую калибровку (как в магнитном поле так и без него) кремниевого вершинного детектора (SVT - Silicon Vertex Tracker) эксперимента STAR (Solenoid Tracker At RHIC) на ускорителе RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США). STAR - универсальный детектор для исследования ядро-ядерных взаимодействий и взаимодействий поляризованных протонов при ультрарелятивистских энергиях. Эксперимент планируется сфокусировать на исследовании мягких процессов, приводящих к рождению адронов с центральными быстротами и поперечными импульсами менее 2 ГэВ/с, и, кроме того, планируется изучать рождение струй, министруй и жестких фотонов. Схематический вид вершинного детектора показан на рис.1. На рисунке видно, что детектор имеет сложную "черепичную" структуру (что необходимо для достижения требуемого аксептанса): он состоит из 216 кремниевых дрейфовых камер, каждая из которых является самостоятельным детектором, определяющим координаты точек взаимодействия частиц в своих собственных единицах.

Задача локальной калибровки детектора SVT заключалась в определении относительных положений дрейфовых камер внутри вершинного детектора и получении корректных координатных преобразований отсчетов детекторов в единую глобальную систему координат. Решение этой задачи для нулевого магнитного поля включало в себя разработку быстрых и точных алгоритмов распознавания траекторий частиц и определения координат первичной вершины взаимодействия.

Задача глобальной геометрической калибровки состояла в определении относительного положения всего вершинного детектора и время-проекционной камеры (Time Projective Chamber - TPC) - базового детектора эксперимента.

Разработанное решение задачи геометрической калибровки вершинного детектора реализуется в три стадии:

- локальная геометрическая калибровка в отсутствии магнитного поля;
- глобальная геометрическая калибровка в магнитном поле;
- локальная калибровка в магнитном поле.

Помимо основной выделим еще следующие цели диссертации.

Программная реализация разработанных алгоритмов в соответствии с требованиями, предъявляемыми к математическому обеспечению эксперимента.

Участие в разработке быстрого робастного алгоритма реконструкции точки взаимодействия в мишени для вершинного телескопа эксперимента CERES/NA45, изучающего рождение пар e^+e^- в столкновениях тяжелых

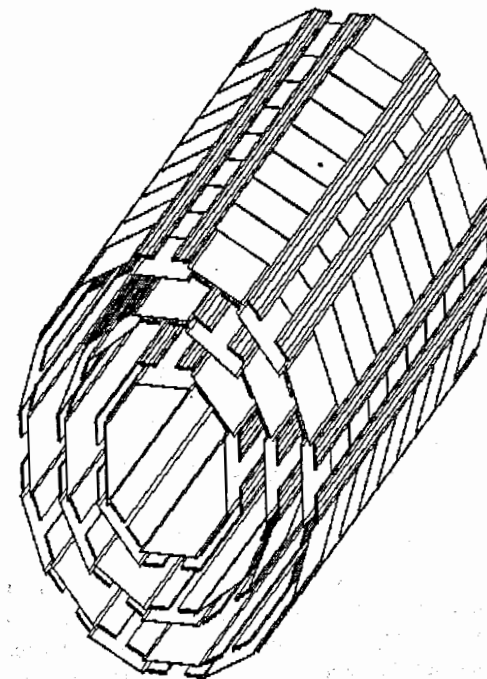


Рис. 1: Схематическое изображение вершинного детектора STAR

ионов на ультрарелятивистских энергиях на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРН (Швейцария).

Разработка калибровочных программ для вершинного телескопа эксперимента CERES/NA45 (см. рис. 2) и исследование точностных возможностей реализованных алгоритмов на реальных экспериментальных данных.

Исследование разработанной методики глобальной геометрической калибровки на задаче определения относительного положения вершинного телескопа и Pad-камеры в эксперименте CERES/NA45.

Научная новизна работы.

Научная новизна работы заключается в успешной разработке эффективной процедуры многоэтапной калибровки вершинных детекторов, учитывающей сложность структуры детекторной системы, связанную с ее многокомпонентностью. При этом создан пакет калибровочных программ для кремниевого вершинного детектора, причем реализуется процедура минимизации сложного функционала по более чем тысяче параметров одновременно. В ходе проведения оптимизации минимизационной процедуры достигнута очень

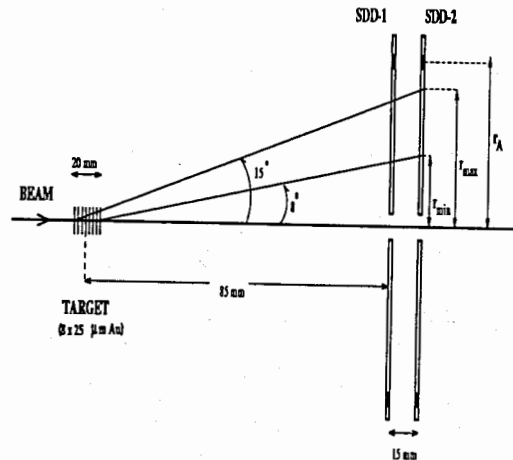


Рис. 2: Схематическое изображение вершинного телескопа эксперимента CERES/NA45

высокая скорость обработки данных, как минимум на порядок превышающая скорость работы стандартных минимизационных пакетов. Вместе с этим разработаны быстрые робастные алгоритмы реконструирования треков и вершин событий для эксперимента STAR, включенные как составные части в процесс геометрической калибровки. Все предлагаемые алгоритмы программно реализованы с использованием объектно-ориентированного подхода и включены в библиотеку стандартных программ коллаборации STAR, для чего к программному коду создан соответствующий интерфейс. Кроме того, принято участие в разработке программы реконструкции первичной вершины взаимодействия для эксперимента CERES/NA45. Для этого же эксперимента реализованы в программном коде разработанные алгоритмы локальной (для определения относительных положений компонент внутри самого детектора) и глобальной (для определения пространственного положения всего детектора) геометрической калибровки.

Все разработанные алгоритмы прошли успешные испытания по методу Монте-Карло на модельных данных, а для эксперимента CERES/NA45 и на реальной экспериментальной информации.

Научно-практическая значимость.

Эксперимент STAR планирует изучать тончайшие нюансы структурного строения вещества на кварковом уровне. Использование кремниевого вершинного детектора с очень высоким позиционным разрешением позволит реализовать ряд уникальных возможностей, таких как обнаружение барионов

с высокой странностью (Ξ^- и Ω^-), изучение свойств очарованных частиц (например, D-мезонов). SVT обеспечит существенное улучшение эффективности реконструкции короткоживущих нейтральных частиц (таких как K_s^0 , ϕ , Λ и $\bar{\Lambda}$), улучшит восстановление треков и идентификацию мягких заряженных частиц (π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} , d и \bar{d}), позволит лучше определять первичную вершину взаимодействия и поможет различать частицы от вторичных распадов. Однако, без корректных координатных преобразований, все преимущества, получаемые за счет великолепной разрешающей способности вершинного детектора, могут быть полностью утрачены, даже в случае разработки совершенных алгоритмов реконструкции событий. Проблема особенно осложняется многокомпонентностью детектора. Поэтому разработка методов многопараметрической геометрической калибровки самого вершинного детектора, а также определение его относительного пространственного положения внутри детектирующей системы являются одной из самых актуальных задач математического обеспечения эксперимента. Разработанный и включенный в официальное математическое обеспечение эксперимента программный код позволит с высокой точностью определить параметры соответствующих передаточных уравнений для осуществления корректных координатных преобразований, что позволит максимально использовать разрешающую способность SVT.

Разработанная минимизационная процедура позволяет быстро определять глобальный минимум нелинейных функционалов даже для многопараметрических задач. Самостоятельная научно-практическая значимость программы многопараметрической минимизации подтверждается ее успешным использованием другими авторами для решения задач разного рода (не только калибровочных).

Разработанные соответствующие проблеме абстрактные типы данных учитывают специфику задачи и представляют самостоятельный научный интерес, поскольку без изменений могут использоваться как для решения других задач того же эксперимента, так и для других (схожего типа) экспериментальных установок.

Апробация работы и публикации.

Полученные результаты докладывались на научных семинарах кафедры теоретической физики и математического моделирования Ивановского государственного университета и в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, на совещании 1997 года коллаборации NA45 в Вейцманском институте (Реховот, Израиль), совещаниях 1997 и 1998 годов коллаборации STAR в Брукхейвенской национальной лаборатории (США), семинарах Вейн университета (Детройт, США) в 1997 и 1998 году, телеконференции разработчиков математического обеспечения для STAR/SVT в 1998 году, рабочих совещаниях CERES/NA45 1998 года в Гейдельберге (ФРГ) и Церн (Швейцария). По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка используемой литературы. Объем диссертации 145 страниц, работа содержит 47 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 62 наименования.

На защиту выносятся следующие результаты:

- доказательство теоремы о числе независимых степеней свободы триплета плоских детекторов при использовании информации о координатах точек взаимодействия с этих детекторов и ограничивающем уравнении, получаемом из условия существования общей первичной вершины;
- реализация быстрого алгоритма восстановления треков для вершинного детектора эксперимента STAR;
- разработка быстрой робастной процедуры реконструирования первичной вершины, позволяющей определять координаты вершины с высокой точностью;
- разработка многопараметрической минимизационной процедуры, позволяющей проводить геометрическую калибровку детекторов с 4 π -геометрией на порядок быстрее стандартных минимизационных пакетов;
- программная реализация процедур локальной геометрической калибровки без магнитного поля, локальной и глобальной калибровки в магнитном поле, разработка соответствующих задач абстрактных типов данных для упрощения чтения, отладки, модификации кода; написание интерфейса ко всем программам созданного пакета, позволяющего внедрить код в рабочую программную среду эксперимента;
- участие в разработке быстрой робастной процедуры реконструирования первичной вершины события для вершинного телескопа эксперимента CERES/NA45;
- создание с применением разработанной минимизационной процедуры калибровочных программ для задач локальной геометрической калибровки вершинного телескопа и определения относительных положений телескопа и Pad-камеры для этого эксперимента.

Содержание работы.

В первой главе сделан обзор методов геометрической калибровки различных детекторных устройств, начиная от активно используемых в прошлом и до находящихся в настоящее время на стадии разработки для использования на новых экспериментальных установках. В главе рассматриваются простейшие модели построения калибровочных преобразований, способы геометрической калибровки спиральных измерителей, системы однокоординатных детекторов, вершинного детектора сходной с SVT структурой, а также в общем виде часто употребляемый для решения калибровочных задач метод Лагранжевых множителей. Изучение уже существующих методик помогло в разработке алгоритма многопараметрической минимизации для калибровочных задач на основе известного метода градиентного спуска, но, вместе с этим, и выявить ряд недостатков существующих методов: известные методики калибровки оптических детекторов не применимы к современным установкам, поскольку основаны на измерении эталонного калибровочного образца. Попытка учесть все возможные параметры геометрической разъюстировки (смещения и повороты) приводит к необходимости решать системы нелинейных уравнений, и сложность этой задачи экспоненциально возрастает с ростом числа параметров, поэтому такие методики могут быть использованы только для сравнительно простых систем, либо позволяют учесть только часть параметров. Попытки разбить детекторную систему на небольшие модули, положение частей которых описывается сравнительно небольшим числом параметров приводит к ряду оставшихся неопределенными параметров в силу наличия большого числа независимых степеней свободы, и, кроме того, требует впоследствии дополнительной калибровки отдельных модулей.

Во второй главе рассказывается о физических и точностных возможностях STAR. Особенный акцент сделан на раскрытии уникальных возможностей, получаемых при введении в базовую конфигурацию экспериментальной установки кремниевого вершинного детектора. Материал, изложенный в этой главе помогает раскрыть актуальность поставленной задачи.

Уникальные возможности SVT включают обнаружение барионов с высокой странностью (Ξ^- и Ω^-) и измерения при низких ($40 \leq p_t \leq 200$ МэВ/с) поперечных импульсах. Изучение редких частиц (таких как D-мезоны и странные мультикварковые состояния), которые невозможно наблюдать с помощью одной TPC, могут стать доступными с SVT. SVT обеспечит существенное улучшение в определении импульсов частиц с большими поперечными импульсами, в эффективности реконструкции для короткоживущих нейтральных частиц, таких как K_s^0 , ϕ , Λ и $\bar{\Lambda}$, и в разделении треков, благодаря отличной разрешающей способности, достигаемой с помощью технологии кремниевых дрейфовых камер. SVT также улучшит восстановление треков и идентификацию мягких заряженных частиц, таких как π^\pm , K^\pm , p ,

\vec{p} , d и \vec{d} , позволит лучше определять первичную вершину и поможет различать частицы от вторичных распадов. SVT-детектор усилит возможности STAR по идентификации частиц и определению импульсов и улучшит акцептанс детектора для явлений с низкими поперечными импульсами. Кроме того, SVT с его высокой разрешающей способностью вблизи от вершины рождения позволяет исключить большую часть комбинаторного фона и значительно улучшает эффективность детектирования странных частиц.

Кроме перечисленного выше введение SVT в детекторную систему STAR открывает еще целый ряд других возможностей. Однако, высокое позиционное разрешение самого детектирующего устройства является необходимым, но отнюдь не достаточным условием очень точных измерений, если наблюдателю неизвестно относительное положение данного устройства среди других частей детекторной системы. Таким образом, важность задачи геометрической калибровки детектора SVT очевидна.

В третьей, ключевой, главе изложены принципы разработанного подхода к решению калибровочных задач эксперимента STAR. В первой части главы проводится исследование пространства калибровочных параметров и доказывается теорема о числе независимых степеней свободы отдельного триплета кремниевых дрейфовых камер. Результатом этого доказательства является, во-первых, вывод о необходимости использовать ограничивающее уравнение, составленное с использованием факта наличия общей первичной вершины у большинства реконструируемых треков события; а во-вторых, вывод о необходимости одновременного определения всех калибровочных параметров вершинного детектора.

Во второй части описывается процедура локальной геометрической калибровки в нулевом магнитном поле и разработанные специально для нее робастные алгоритмы реконструкции событий. Обсуждается выбор оптимальной параметризации треков частиц. Предлагается использовать два вектора для определения пространственной траектории:

$$\vec{P}_i = \vec{a} + \lambda_i \vec{b}, \quad (1)$$

где \vec{P}_i - i -ая точка трека, \vec{b} - вектор, определяющий ориентацию трека в пространстве, \vec{a} - вектор, определяющий минимальное расстояние между осью пучка и треком в плоскости, перпендикулярной оси пучка (т.е. по определению $(\vec{b} \cdot \vec{a})|_{xy} = 0$), и λ - параметр, задающий положение точки вдоль трековой линии. Выбранная таким образом параметризация позволяет проводить быстрое безытеративное определение трековых параметров и координат исходного взаимодействия (т.е. вершины события).

Оптимальное положение вершины определяется при помощи минимизации функционала K , определенного как сумма квадратов кратчайших рас-

стояний для всех треков.

$$K = \sum_{j=1}^{N_t} \omega_j (\vec{a}_j + \lambda_j^c \vec{b}_j - \vec{V})^2. \quad (2)$$

Здесь \vec{V} - пока еще неизвестное положение вершины. Вес ω_j используется для каждого трека для того, чтобы превратить всю процедуру в робастную, т.е. уменьшить вклад шумовых треков или треков, восстановленных корректно, но не происходящих из первичной вершины взаимодействия. Была использована весовая функция Тьюки, являющаяся оптимальной для взвешенного метода наименьших квадратов:

$$w(t) = \begin{cases} (1 - (t/c_T)^2)^2, & \text{при } |t| < c_T, \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (3)$$

где через c_T обозначена константа Тьюки, которая выбирается по определенным правилам в соответствии с отношением сигнал/шум. Здесь же приводятся результаты исследования точности предложенных методик реконструкции треков и определения координат первичной вершины взаимодействия. Введение весовой функции Тьюки позволило существенно увеличить точность восстановления координат вершины (см. таблицу).

Таблица 1: Точность восстановления вершины

Метод	σ_x	σ_y	σ_z
Простой	23.43	10.35	10.91
Робастный	7.15	4.92	5.36
	μm		

Описывается составленный калибровочный функционал, учитывающий влияние всех параметров разъюстировки. Функционал составлен таким образом, что его большие значения соответствуют наличию разъюстировки, а минимальные - идеальной геометрической калибровке, и, следовательно, корректным координатным преобразованиям:

$$G = \sum_{cv=1}^{N_{events}} \left(\sum_{j=1}^{N_{t,cv}} L_{j,cv} + K_{cv} \right). \quad (4)$$

Первая часть функционала учитывает остатки (измеряемые отклонения точек) каждого трека, определенная как:

$$L_{j,ev} = \left(\sum_{i=1}^3 \left((a.x_j + \frac{(\bar{P}_i, \bar{b})|_{xy}}{(\bar{b}, \bar{b})|_{xy}} b.x_j - P_i.x)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. (a.y_j + \frac{(\bar{P}_i, \bar{b})|_{xy}}{(\bar{b}, \bar{b})|_{xy}} b.y_j - P_i.y)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. (a.z_j + \frac{(\bar{P}_i, \bar{b})|_{xy}}{(\bar{b}, \bar{b})|_{xy}} b.z_j - P_i.z)^2 \right) \right) / N_{t,ev},$$

\bar{P}_i – точки взаимодействия частицы с детекторными пластинами, отнесенные к одному треку. Второе слагаемое учитывает ширину вершины:

$$K_{ev} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{t,ev}} ((\bar{a}'_j, \bar{a}'_j) - \frac{(\bar{a}'_j, \bar{a}'_j)^2}{(\bar{b}, \bar{b})})}{N_{t,ev}},$$

где \bar{a}'_j определен как:

$$\bar{a}'_j = \bar{V} - \bar{a}_j,$$

где “j” указывает на j-ый трек события “ev”. Для каждого события вершина \bar{V}_{ev} (предварительно определенная минимизацией вышеописанного функционала K) характеризуется функционалом K_{ev} .

В третьей части главы описывается геликоидная модель параметризации треков в ненулевом магнитном поле, используемая в задачах локальной и глобальной геометрической калибровки SVT при $B > 0$. Выбор параметризации основан на двух предположениях: магнитное поле внутри детекторной системы однородно и потери энергии частиц из-за эффекта многократного рассеяния пренебрежимо малы. В этом случае можно использовать простую геликоидную модель:

$$R_{Hi}^2 = (x - x_{ci})^2 + (y - y_{ci})^2, \quad (5)$$

$$z = z_{0i} + L \operatorname{tg}(\psi_i). \quad (6)$$

Движение частицы в идеально однородном магнитном поле описывается окружностью в поперечной плоскости и прямой линией в проекции $z\psi_i$. Здесь R_{Hi} – радиус проективной окружности, соответствующей i-му треку (что эквивалентно радиусу геликоиды в таблицах TPTRACK); (x_{ci}, y_{ci}) – ее центр, z_{0i} – z-координата ближайшей к оси пучка точки геликоиды, L – длина дуги траектории частицы между точками z_{0i} и (x, y, z) , ψ_i – угол,

отражающий движение частицы в поперечной плоскости, определяемый также от ближайшей к оси пучка точки геликоиды. По построению:

$$\operatorname{tg}(\psi_i) = \frac{\bar{P}_i \cdot \hat{z}}{\sqrt{(\bar{P}_i \cdot \hat{x})^2 + (\bar{P}_i \cdot \hat{y})^2}} \quad (7)$$

Вполне очевидно, что такая модель верна в случае, когда магнитное поле совпадает по направлению с осью “z” глобальной координатной системы. Поэтому при неправильно проведенной калибровке ожидается плохое согласие по критерию χ^2 для треков. Из этих соображений и был составлен функционал, использующийся для обеих геометрических калибровок детектора в магнитном поле:

$$G = \sum_{\alpha=1}^{N_{events}} \frac{\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^3 (A_{i,j}^2 + B_{i,j}^2)}{N_t}, \quad (8)$$

где N_t – число треков в событии с индексом ev,

$$A_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_{ci})^2 + (y_j - y_{ci})^2} - R_{Hi}$$

– соответствует расстоянию между измеряемой SVT-точкой и геликоидой в плоскости, перпендикулярной оси пучка.

$$B_{i,j} = z_j - z_{0i} - \operatorname{tg}(\psi_i)L$$

– соответствует расстоянию между точкой взаимодействия частицы с детекторной пластиной и геликоидой в zL проекции. Длина дуги траектории L определяется посредством теоремы косинусов.

В последней части главы описана разработанная процедура многопараметрической минимизации, используемая для обоих функционалов, а также некоторые аспекты оптимизации работы минимизационного алгоритма и методы качественной оценки алгоритма. Минимизация функционалов G (4, 8) проводилась при помощи метода быстрого (или градиентного) спуска. Этот метод хорошо известен и успешно применяется для решения минимизационных задач. Важнейшими моментами его реализации являются вычисление частных производных, определение начального приближения и весов различных параметров. Для рассматриваемых калибровочных задач аналитическое вычисление производных невозможно, поскольку выразить аналитически зависимость $G = G(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \alpha, \beta, \gamma)$ от всех калибровочных параметров (для случая локальной геометрической калибровки без магнитного поля таких параметров 1296) не представляется возможным (во всей работе в ка-

честве категорий калибровочных параметров использовались поправки, соответствующие шести степеням свободы твердого тела: три смещения вдоль координатных осей и три поворота вокруг них). В предлагаемом алгоритме для определения соответствующих значений, производные заменяются разностными схемами и вычисляются численно. В качестве начального приближения используются данные калибровочных измерений (лазер, микроскоп и т.д.), что является достаточно удобным. Определение какого-либо другого более точного начального приближения не требуется, так как проведенные исследования показали, что в рассматриваемых пределах возможных значений параметров (определяемых из физических соображений) алгоритм работает очень устойчиво и изменение (в этих пределах) начального приближения не приводит к изменению результатов.

Традиционный выбор весов, необходимых для определения новых значений параметров в соответствии со значениями их частных производных, приводит к необходимости решать систему нелинейных уравнений, что приводит к большим вычислительным сложностям в связи с многопараметричностью задачи. В работе предложена следующая схема. Сначала проводилось определение численных значений производных функционала по параметрам калибровки μ_i (пространства параметров для всех трех стадий калибровки различны):

$$\frac{\partial G}{\partial \mu_i} = \frac{G(\mu_i + \delta \mu_i) - G(\mu_i - \delta \mu_i)}{2\delta \mu_i}, \quad (9)$$

где μ_i – один из искомых параметров (позиций и ориентаций), $\delta \mu_i$ – размер шага для данного параметра, используемый на i -ой итерации. Размер шага подбирался и вычислялся индивидуально для каждой категории параметров ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$). Для этого проводилось сканирование профиля функционала по соответствующим параметрам и исследовалось влияние каждой отдельной категории на поведение функционала. После вычисления всех производных, определяются новые значения параметров с учетом значений соответствующих производных. Для увеличения скорости спуска и во избежание определения локальных минимумов, изменения параметров нормализовались на максимальное значение определенное для всех производных. Для каждой итерации j в программной реализации алгоритма вычисляется:

$$\mu_i^j = \mu_i^{j-1} - \frac{\partial G}{\partial \mu_i} \frac{\delta \mu_i}{\text{MAX}(\frac{\partial G}{\partial \mu_i})} \Delta_j,$$

где Δ_j – безразмерный шаг, общий для всех параметров. Предложенный способ выбора подходящих коэффициентов позволяет решить проблему, связанную с необходимостью решать систему нелинейных уравнений, и приводит к быстрому получению решений с высокой точностью. Кроме этого,

в главе излагаются некоторые аспекты оптимизации минимизационной процедуры.

В конце главы описываются используемые методы качественной оценки алгоритма. Все качественные исследования алгоритма геометрической калибровки были проведены с помощью метода Монте-Карло. Моделирование событий для процесса геометрической калибровки включает в себя следующие шаги:

- Моделирование конечных состояний частиц с использованием таких моделей как HIJING или FRITIOF для имитации центральных Au+Au столкновений при энергиях $\sqrt{s} = 200$ ГэВ.
- Проведение треков частиц через реалистичную модель детектора STAR (с идеальной геометрией) и, в частности, SVT детектор для определения трековых пересечений в детекторах, т.е. положения соударений.
- Моделирование разъюстировки детектора.
- Переопределение положений точек взаимодействия, полученных с идеальной геометрией, для учета смоделированной разъюстировки.

Разъюстировка пластин для исследования качества локальной геометрической калибровки в нулевом магнитном поле проводилась с помощью независимой процедуры, которая использует номинальные (идеальные) положения и ориентации кремниевых дрейфовых камер в качестве входных параметров. Положения и углы каждого кремниевого детектора случайным образом модифицируются с использованием равномерно распределенных случайных величин. Для исследования точностных возможностей предлагаемых алгоритмов были использованы три метода оценки качества геометрической калибровки: непосредственное сравнение восстановленных положений и углов с идеальными данными, сравнение ширины вершин, сравнение χ^2 -распределений треков.

В четвертой главе приведены результаты исследования всех трех стадий геометрической калибровки вершинного детектора эксперимента STAR: локальной геометрической калибровки без магнитного поля, локальной и глобальной калибровок в магнитном поле. Приведены данные об ошибках определения параметров для каждой стадии, результаты сравнительного исследования распределений χ^2 треков, являющихся показателем качества процедуры калибровки. Для случая локальной геометрической калибровки в магнитном поле приведены результаты исследования корреляционных взаимосвязей между параметрами и способы решения проблем, возникающих из-за их существования.

Полученные оценки параметров для всех трех стадий геометрической калибровки оказались несмещенными и хорошо описывались гауссианами, что свидетельствует о нормальном распределении статистических ошибок определения параметров. В случае локальной геометрической калибровки в нулевом магнитном поле даже при обработке всего десяти событий при помощи разработанных алгоритмов удается достигнуть очень хорошей точности:

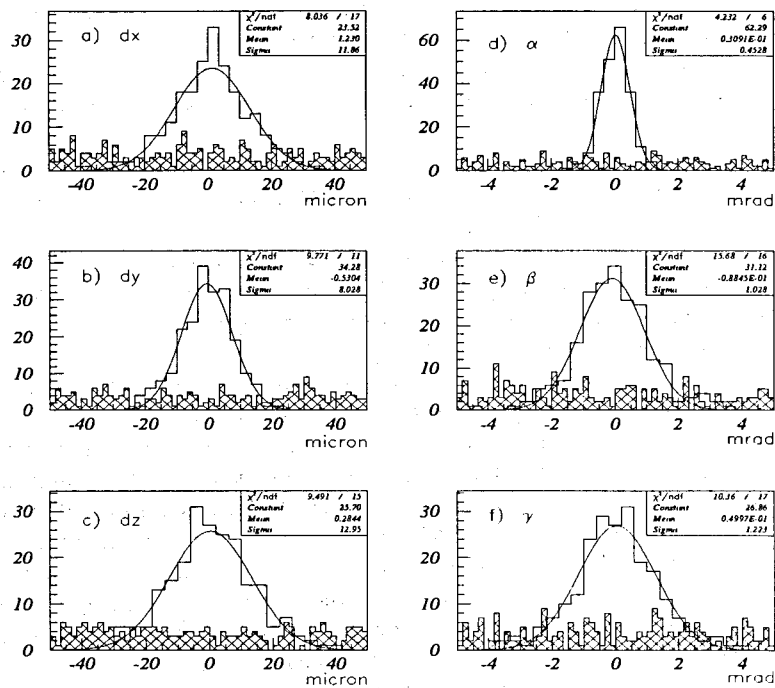


Рис. 3: Ошибки определения параметров при проведении локальной геометрической калибровки

менее $15\mu\text{m}$ для величин остаточных смещений и менее 1.5mrad для вращательных параметров (см. рис. 3). Аналогичные показатели для процедуры локальной геометрической калибровки в ненулевом магнитном поле - $9\mu\text{m}$ и 0.7mrad (см. рис. 4), для процедуры глобальной геометрической калибровки - $2.5\mu\text{m}$ и 0.1mrad (см. рис. 5). Полученная точность геометрической калибровки выше разрешающей способности самих дрейфовых камер и всего вершинного детектора, и потому каких-либо дополнительных калибровочных процедур, использующих другие ограничительные уравнения, не требуется.

Полученные после калибровки значения функционалов (полные χ^2 треков), чувствительных к разбюстировкам детектора, отличаются от идеальных (и, соответственно, минимальных) значений всего на 11% на этапе локальной калибровки при напряженности магнитного поля $B = 0$; менее, чем

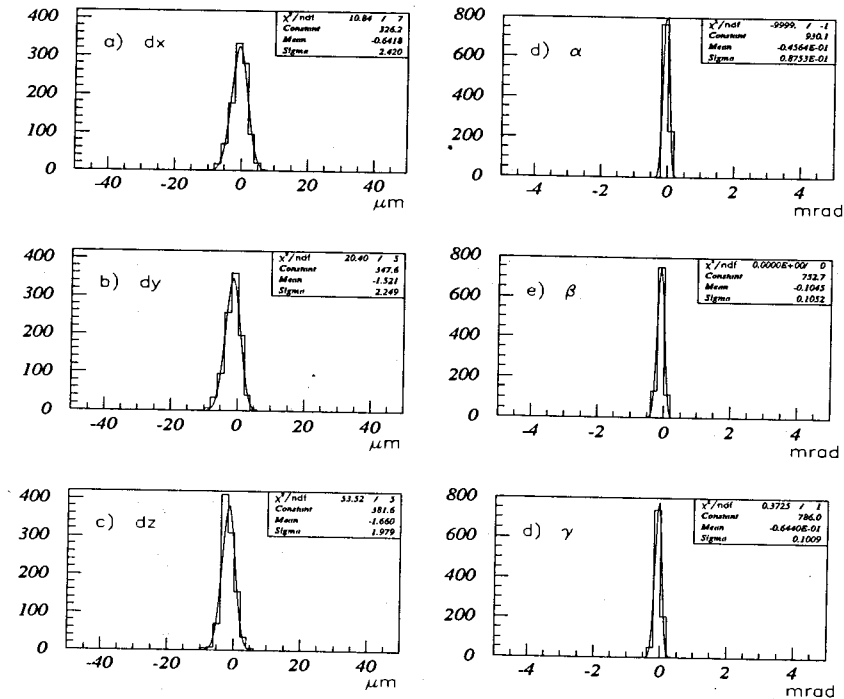


Рис. 4: Ошибки определения калибровочных параметров при определении относительных положений SVT и TPC

на 1% при проведении локальной юстировки при $B > 0$; и менее, чем на 0.6% после проведения определения относительного расположения кремниевго вершинного детектора и время-проекционной камеры. Эти данные тоже свидетельствуют о способности минимизационной процедуры качественно определять положение минимума функционала. Сравнительный анализ ширины вершин до и после геометрической калибровки, используемый для оценки качества локальной геометрической калибровки без магнитного поля, показал, что разбюстировка детектора даже в незначительной степени (порядка $100\mu\text{m}$, т.е. в пределах, гарантируемых возможностями сборки) приводит к существенному снижению разрешающей способности по параметру соударения. На рис. 6 видно, что после проведения геометрической калибровки, ширина вершины становится практически такой же, как для идеальной геометрической конфигурации.

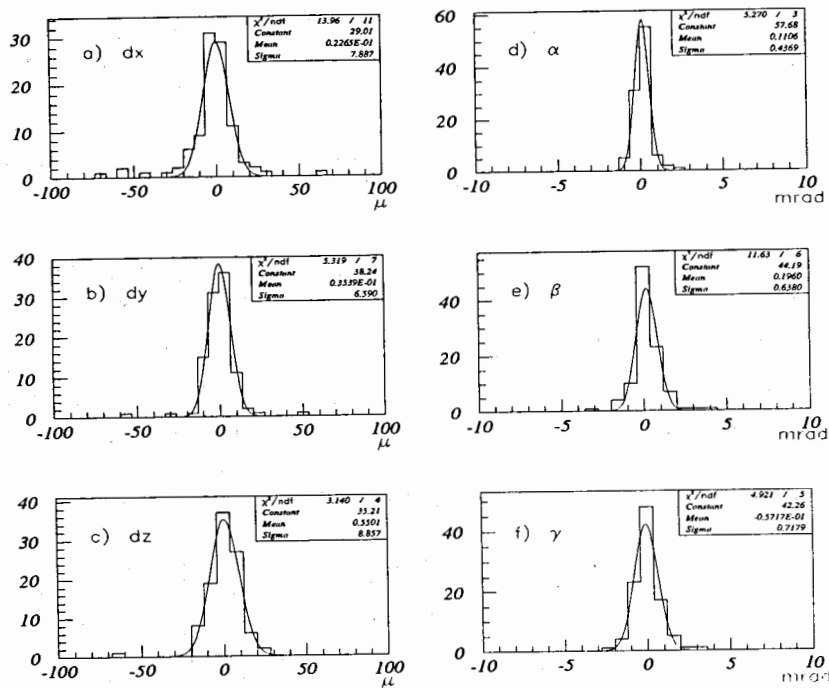


Рис. 5: Распределения ошибок определения геометрических поправок при проведении локальной калибровки в магнитном поле

Эти результаты позволяют сделать вывод, что разработанный быстрый алгоритм геометрической калибровки кремниевого вершинного детектора эксперимента STAR, позволяет с высокой точностью проводить определение как относительных положений кремниевых дрейфовых камер внутри SVT, так и относительное положение SVT и время-проекционной камеры, как в магнитном поле, так и без него.

В пятой главе представлены результаты исследования предлагаемого алгоритма на калибровочных задачах эксперимента CERES/NA45. Описан разработанный совместно с группой программистов Объединенного Института Ядерных Исследований робастный алгоритм восстановления первичной вершины событий, и приведены результаты исследования этого алгоритма на реальных экспериментальных данных. На рис. 7 видно, что на распределении z -координат вершин, полученном при обработке образца, состоящего из

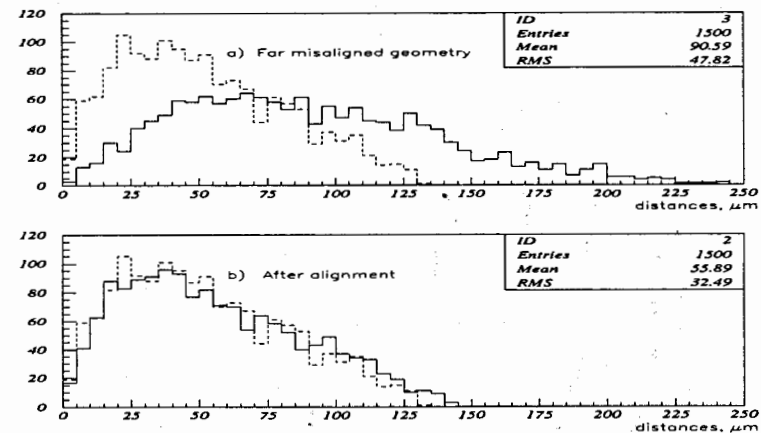


Рис. 6: Ширина реконструированной вершины. (a) – при смоделированной разъюстировке детектора, (b) – после проведения геометрической калибровки. Пунктирной линией показано распределение для идеальной геометрической конфигурации.

4000 Pb+Au экспериментальных событий, все пики, соответствующие восьми дискам мишени хорошо разделены и имеет форму гауссианов. Точность разработанного робастного подхода оказалась немного выше точности метода суммарных гауссовых весов, используемого ранее для обработки данных CERES/NA45, при этом быстродействие предложенного быстрого алгоритма на два порядка выше.

Предлагаемые алгоритмы геометрической калибровки были реализованы в программном коде для поиска юстировочных параметров кремниевых дрейфовых камер, составляющих вершинный телескоп, и определения относительного положения Rad-камеры и всего вершинного телескопа. После изучения калибровочных процедур на соответствующих модельных данных, калибровочный алгоритм исследовался на реальных экспериментальных данных, полученных в 1995 и 1996 годах. Разработанный алгоритм показал хорошую точность определения параметров, устойчивость к зашумленности (неизбежной в экспериментальных данных), нечувствительность к выбору начальных значений параметров (в исследуемых пределах). Определенные в ходе исследований ошибки метода в определении параметра составляют менее $3\mu\text{m}$ и 1.2mrad для смещений и поворотов соответственно. В таблице приведены значения калибровочных параметров для вершинного телескопа, полученные различными методами (в том числе и с помощью использованного ранее в эксперименте CERES/NA45 минимизационного пакета

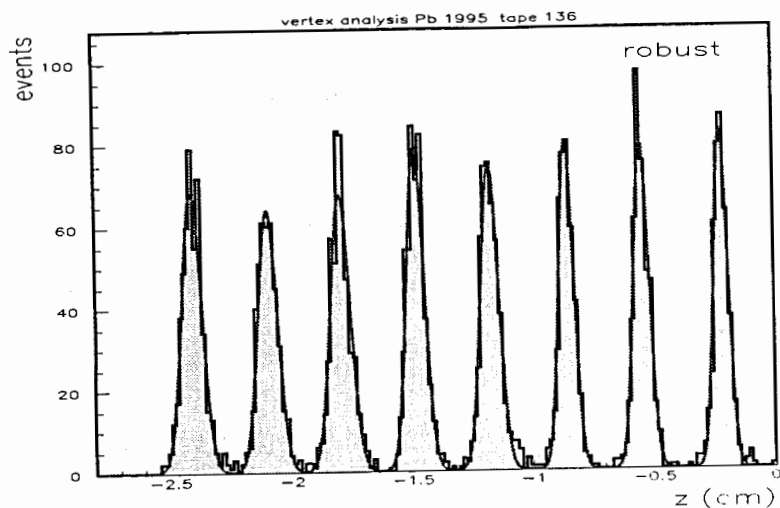


Рис. 7: Распределение z -координат восстановленных вершин событий, отфильтрованное восемью гауссианами (соответственно восьми дискам мишени) для робастного подхода

MINUIT).

Из приведенных данных видно, что значения полученных различными методами поправок совпадают в пределах ошибок, но точность определения параметров предлагаемым алгоритмом с использованием одновременной обработки ансамбля событий существенно выше (ошибки определения параметров для MINUIT не приведены, поскольку для этой задачи пакетом не определяются).

Разработанный подход позволяет определять калибровочные поправки без привлечения дополнительных минимизационных пакетов, что само по себе позволяет существенно выиграть во времени. Кроме этого, быстрый робастный алгоритм реконструкции главной вершины событий, уже включенный в математическое обеспечение эксперимента CERES/NA45 и используемый при проведении процедуры калибровки, кроме дополнительной экономии машинного времени, позволил за счет увеличения разрешения по всем координатам определяемой вершины уточнить значения принятых в эксперименте геометрических поправок. В настоящее время PAD-камера в этом эксперименте заменена на время-проекционную, кроме того, произведены изменения конфигурации вершинного телескопа, и, следовательно, решение калибровочных задач становится неотложной задачей. Сейчас проводится калибровка детекторной системы при помощи предлагаемых алгоритмов.

Таблица 2: Найденные при помощи различных подходов значения поправок (данные 1995 года)

Параметры	Пред. алгоритм	Пред. алгоритм	MINUIT
		Последовательная обработка	
$\Delta x(\mu m)$	33.4 ± 2.3	38.1 ± 17.7	38.0
$\Delta y(\mu m)$	-25.7 ± 2.6	-7.3 ± 18.4	-11.1
$\Delta z(\mu m)$	-30.7 ± 1.7	-22.6 ± 29.2	-20.05
$\alpha(mrad)$	-0.2 ± 0.3	-0.8 ± 2.0	1.4
$\beta(mrad)$	-10.5 ± 0.99	-6.5 ± 4.7	-7.7
$\gamma(mrad)$	0.7 ± 1.01	1.1 ± 5.1	4.6

Успешное применение разработанных алгоритмов к обработке реальных данных эксперимента CERES/NA45 подтверждает надежность используемых пока на псевдореальных данных эксперимента STAR подходов (смоделированных при помощи программы GEANT).

В шестой главе приведено описание структур, используемых в созданном для решения калибровочных задач программном пакете. Для применения разработанных алгоритмов и их включения в математическое обеспечение эксперимента STAR был выбран язык программирования C++ с использованием преимуществ объектно-ориентированного подхода, что согласуется с общими тенденциями развития математического обеспечения современных крупных экспериментов физики элементарных частиц. Созданные абстрактные типы данных, описываемые в этой главе, связаны, с одной стороны, со сложной геометрической конфигурацией экспериментальной установки, а с другой, с физической природой проблемы. Для более легкого чтения, пакет состоит из логически законченных, сравнительно небольших файлов, объединяющихся через интерфейс, определенный в так называемых в C++ заголовочных файлах. Организованный таким образом код облегчает процесс отладки программы, увеличивает надежность ее работы и предоставляет возможность легко модифицировать программы по мере необходимости. Разработанное математическое обеспечение имеет самостоятельную научную значимость и может использоваться разными программистами для решения различных задач, практически не требуя времени на изучение структур.

В заключении к работе подытожены основные ее результаты, а в приложениях А и Б вынесены изображения детекторных систем экспериментов ALEPH и STAR, необходимые для наглядности.

Работа выполнена в 1996 - 1999 годах в Ивановском государственном

университете и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Список публикаций.

1. O. Barannikova, G. Ososkov, Yu. Panebratsev. The Alignment of SDD within SVT system. JINR Communication, E10-96-443, Dubna, 1996.
2. H. Agakishiev, O. Barannikova, F. Ceretto, et al. New Robust Fitting Algorithm For Vertex Reconstruction in the CERES Experiment. Nucl. Instr. and Methods A394 (1997), p. 225-231.
3. O. Barannikova, G. Ososkov, Yu. Panebratsev. Investigation of the fast algorithms for the track reconstruction and vertex finding using new computational model with real STAR-SVT geometry. JINR Communication, E10-98-278, Dubna, 1998.
4. O. Yu. Barannikova, L. Muresan, G. A. Ososkov, et al. SVT Internal Alignment Package. STAR Note 0356, 1998.
5. O. Yu. Barannikova, L. Muresan, G. A. Ososkov, et al. Specification of SVT Global Alignment Package. STAR Note 0364, 1998.
6. H. Agakishiev, O. Yu. Barannikova, V. V. Belaga, et al. Alignment of detectors at CERES/NA45. JINR Communication, E10-98-277, Dubna, 1998.
7. O. Yu. Barannikova, V. V. Belaga, R.K. Bellwied, et al. STAR/SVT Alignment within a Finite Magnetic Field. JINR Communication, E10-99-60, Dubna, 1999.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 апреля 1999 года.