

БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ КОЛЕЦ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ДЕТЕКТОРЕ RICH ЭКСПЕРИМЕНТА CBM

С. А. Лебедев^{а,б,1}, Г. А. Ососков^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна

^бGesellschaft für Schwerionenforschung mbH, Дармштадт, Германия

Описаны алгоритмы распознавания колец черенковского излучения, основанные на преобразовании Хафа (ХТ), а также новые идеи, позволившие существенно ускорить ХТ-алгоритм. Эллиптичность формы многих колец потребовала разработки специального алгоритма для подгонки эллипсов, что позволило также улучшить процедуры согласования колец и треков и идентификации электронов. Приведена усовершенствованная процедура коррекции радиусов. Дано детальное описание алгоритма устранения ложных колец, основанного на применении искусственных нейронных сетей. Представлены результаты идентификации первичных электронов. Все разработанные алгоритмы были протестированы на большой статистике модельных событий, а реализующие их программы включены в программную оболочку эксперимента для общего использования.

Ring recognition algorithm based on the Hough Transform method (HTM) as well as the innovations which allow one to speed up the HTM algorithm considerably are described. An ellipse fitting algorithm has been elaborated because most of the CBM RICH rings have elliptic shapes, moreover, it helps to improve then ring-track matching and electron identification procedures. An elaborated procedure of the radius correction is also presented. Detailed study of the procedure of fake rings eliminating by artificial neural networks is given. Results of the primary electron identification are presented. All developed algorithms were tested on large statistics of simulated events and are included into the CBM software framework for common use.

PACS: 29.40.Ka; 42.60.Da

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует несколько способов решения задачи распознавания событий в детекторах частиц, основанных на принципиально разных подходах: локальном и глобальном (к последнему относится, в частности, применение нейронных сетей) [1–4]. В локальных подходах обычно используются алгоритмы прослеживания, т. е. сначала с использованием нескольких точек отбирается какой-то образ-кандидат, а затем делаются предсказания относительно положения (координат) других точек, принадлежащих этому кандидату, например интерполяцией или экстраполяцией текущей модели образа на основе уже найденного образа-кандидата. Если дополнительные точки найдены, они добавляются к образу-кандидату, в противном случае кандидат отбрасывается после определенного числа попыток, зависящего от степени неэффективности

¹E-mail: S.Lebedev@gsi.de

детектора, которая принимается в расчет алгоритмом. Примерами локального подхода являются различные алгоритмы прослеживания треков [1–3]. Метод называется глобальным, если все объекты (точки) входят в алгоритм поиска события одинаковым образом. Такой алгоритм может рассматриваться как общая обработка полной совокупности измеренных координат события. Примерами глобального подхода для трековых камер являются методы подбора шаблонов и построения поворотных гистограмм [3].

Вопрос о выборе наиболее эффективного метода распознавания образов возник при решении задачи распознавания колец черенковского излучения в детекторе RICH (Ring Imaging Cherenkov Detector) эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) [5]. Этот детектор предназначен для идентификации электронов в событиях, полученных при взаимодействии тяжелых ионов золота, и рассчитан на работу в диапазоне импульсов от 0,5 до 10–12 ГэВ/с. Высокая множественность частиц в каждом событии ведет к возникновению большого числа колец, большинство из которых порождено фоновыми частицами — пионами и вторичными электронами. Зашумленность данных и большое число взаимно пересекающихся колец требуют привлечения таких помехоустойчивых глобальных методов распознавания, как преобразование Хафа (Hough-transform — HT) [6], которое можно рассматривать как дискретный аналог более общего преобразования Радона [7, 8]. Этот подход предоставляет возможность распознавания глобальных образов в пространстве изображений посредством распознавания локальных образов (в идеальном случае точек) в пространстве параметров. Метод особенно полезен, когда искомые образы имеют «провалы» из-за пропусков оцифровки, а само изображение зашумлено. В случае распознавания колец черенковского излучения в детекторах типа RICH эти кольца видны как точки на плоскости фотодетектора RICH и хорошо аппроксимируются окружностями, т. е. кривыми, определяемыми тремя параметрами. Поэтому преобразование Хафа, примененное к отдельным сигналам фотодетектора, позволяет вычислить так называемые хаф-образы сигналов в трехмерном пространстве параметров, характеризующих кольцо. Необходимость многократного перебора точек в исходном пространстве измерений, присущее подобным глобальным методам, приводит к большим временным затратам на программную реализацию алгоритмов HT, что остается главным недостатком HT, несмотря на разные способы снижения размерности путем сведения преобразования к последовательному применению двумерного HT для оценки центра, а потом одномерного — для определения радиуса окружности.

В этой связи нами был разработан алгоритм локализованного преобразования Хафа, который позволяет более чем на порядок сократить перебор и, соответственно, временные затраты на выполнение HT. Кроме того, наличие неизбежных оптических искажений, приводящих к тому, что большинство колец приобретают эллипсовидную форму, потребовало также разработки специальных алгоритмов для выявления и компенсации таких искажений. Это позволило существенно повысить эффективность последующих процедур стыковки колец с порождающими их треками частиц, устранения ложно найденных колец и идентификации электронов.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР RICH-ДЕТЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТА CBM

В текущем дизайне CBM-детекторов (рис. 1) RICH расположен за вершинным детектором STS/MVD (Silicon Tracking System — STS, Micro-Vertex Detector — MVD детекторы) и перед детектором переходного излучения (Transition Radiation Detector —

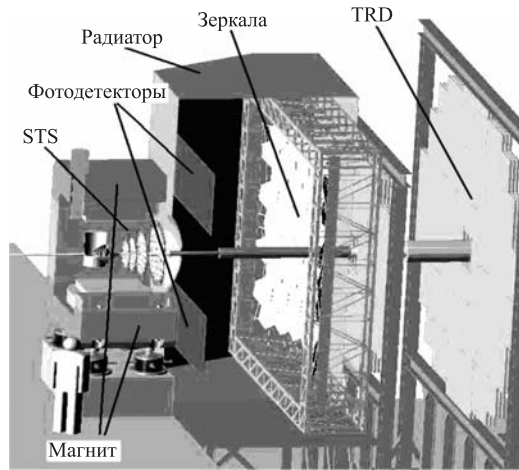


Рис. 1. Дизайн RICH-детектора, который расположен за вершинным детектором (STS). За RICH будет расположено несколько станций детектора переходного излучения (TRD) для дальнейшей идентификации электронов и трекинга

TRD) [9]. Радиатор детектора RICH заполнен азотом, длина радиатора — 2,5 м, радиус зеркал — 4,5 м, в качестве фотодетектора используется набор из 65 тыс. фотоэлементов типа H8500-03 (элементы MAPMT фирмы Hamamatsu). Для данной конфигурации радиус электронных колец приблизительно равен 6 см, а среднее количество точек на электронное кольцо $\langle N_{\text{hit}} \rangle = 22$.

Так как эксперимент CBM находится на стадии проектирования и моделирования, когда нет еще экспериментальных данных, все данные были смоделированы с помощью программного обеспечения эксперимента [10]. Для симуляции типичной для CBM реакции использовалось центральное столкновение Au+Au при 25A ГэВ.

Обработка событий в RICH-детекторе включает в себя несколько этапов [11]. На первом этапе треки, найденные в вершинном детекторе, экстраполируются до виртуальной плоскости перед зеркалами RICH и проецируются на плоскость фотодетектора, чтобы получить их точки пересечения с этой плоскостью (рис. 2, а). В заключение первого этапа с помощью специальной программы, которая моделирует ответ фотодетектора, получают точки-хиты, образующие характерные кольца черенковского излучения (рис. 2, б), радиус которых в совокупности с импульсом, измеренным в вершинном детекторе, и позволяет идентифицировать частицы, приведшие к формированию колец.

Второй этап начинается с реконструкции этих колец по данным измерений в фотодетекторе, то есть точки должны быть сгруппированы по их принадлежности к тому или иному кольцу. После этого по точкам из каждой группы подгоняется окружность или эллипс для получения более точных параметров колец.

На последнем этапе отбираются только те кольца, которые могут быть состыкованы с треками, экстраполированными из вершинного детектора STS (рис. 2, в), отсеиваются ложные кольца, образованные случайными комбинациями точек, и выполняется процедура идентификации частиц по радиусам колец и импульсу, полученному от состыкованного трека из вершинного детектора.

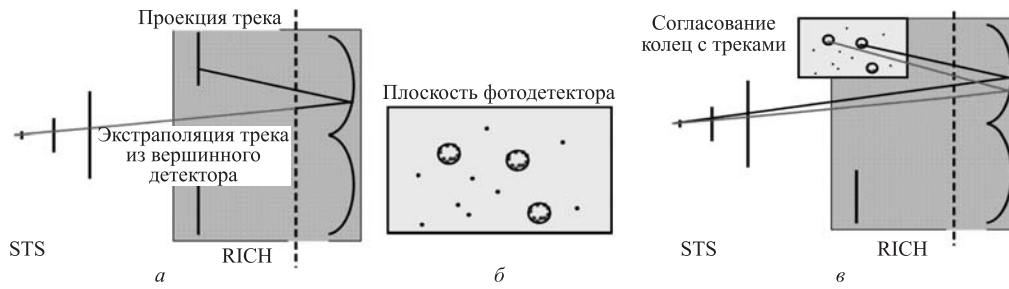


Рис. 2. *a* — схематический рисунок STS- и RICH-детекторов, экстраполяция и проекция трека на плоскость фотодетектора; *б* — плоскость фотодетектора с точками и найденными кольцами; *в* — согласование колец и треков

Основные проблемы поиска колец следующие:

- большое количество точек (около 100–120 колец каждое в среднем с 22 точками в центральном столкновении Au+Au при 25A ГэВ);
- большое количество проекций треков из вершинного детектора (около 600 треков) осложняют их состыковку с кольцами;
- высокая плотность колец, особенно в центральной части плоскости фотодетектора;
- появление фантомных — ложных — колец из-за их зашумленности и взаимных пересечений.

2. АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ КОЛЕЦ

2.1. Преобразование Хафа. Преобразование Хафа — стандартный метод для распознавания фигур на оцифрованном изображении, то есть поиск прямых линий, окружностей, эллипсов. Алгоритм ищет кривые, которые проходят через подходящее количество точек. Множество кривых на плоскости задано параметрическим уравнением $F(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, x, y) = 0$, где F — это в общем случае нелинейная функция; a_1, a_2, \dots — это параметры множества кривых; x, y — координаты на плоскости. Пространство параметров (пространство Хафа) имеет размерность, равную числу параметров кривой, так что каждая точка в этом пространстве (определенное значение a_1, a_2, \dots) соответствует определенной кривой в исходном пространстве измерений. Из-за наличия ошибок измерений, а также дискретности машинного представления входных данных, необходимо перевести непрерывное пространство Хафа в дискретное. Для этого мы разбиваем его на ячейки, каждая из которых соответствует набору кривых с близкими значениями параметров. Каждую ячейку пространства параметров можно рассматривать как ячейку гистограммы, содержимое которой дает нам количество кривых на изображении, соответствующих данной ячейке. Таким образом, задачей является анализ гистограммы с целью найти наиболее заселенные ячейки. Каждая такая ячейка определяет параметры кривых на исходном изображении.

2.2. Преобразование Хафа для распознавания окружностей. Установить соответствие между пространствами измерений и параметров в случае окружностей можно следующим образом: поскольку через каждые три точки можно провести окружность,

перебирают все тройки измеренных точек (триплеты) и заполняют их параметрами трехмерную гистограмму с тем, чтобы затем искать в ней наиболее заселенные ячейки. Как уже отмечалось выше, прямая реализация такого алгоритма, оказывается слишком вре­мяемкой для реальных применений.

Разработанный нами алгоритм локализованного преобразования Хафа оказался на не­сколько порядков более быстрым по времени. Приведем его основные этапы с описанием методов, предложенных для ускорения вычислений на каждом этапе.

2.2.1. Ускорение вычислений. Запишем параметрическое уравнение окружности $(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$, где a и b — координаты центра окружности, а R — ее радиус. Таким образом, уравнение $F(a, b, R, x, y) = (x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2$ определяет семейство окружностей. Через любые три точки можно однозначно провести окружность, то есть вычислить три ее параметра (a, b, R) , решив следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2 &= R^2; \\(x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2 &= R^2; \\(x_3 - a)^2 + (y_3 - b)^2 &= R^2.\end{aligned}$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ — координаты 1-й, 2-й, 3-й точек соответственно. Решение дает нам следующие выражения для определения центра и радиуса окружности:

$$\begin{aligned}a &= \frac{1}{2} \frac{(x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2)(y_1 - y_2) - (x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2)(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)(y_1 - y_2) - (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)}, \\b &= \frac{1}{2} \frac{(x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2)(x_2 - x_3) - (x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2)(x_1 - x_2)}{(x_2 - x_3)(y_1 - y_2) - (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)}, \\R &= \sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2}.\end{aligned}$$

Поскольку эта группа вычислений является наиболее часто повторяемой в НТ-преобра­зовании, из реализующей ее программы были убраны все повторяющиеся промежуточные вычисления и проведена оптимизация по числу считывания данных из памяти компью­тера. В итоге это позволило ускорить общее время поиска колец почти на 15 %.

2.2.2. Быстрый поиск точек в заданной области. Для того чтобы ускорить поиск необходим быстрый алгоритм, определяющий все точки, находящиеся в области фо­тодетектора, в которой производится поиск. Для этого вначале точки сортируются по X -координате. Мы выбрали сортировку по X , потому что распределение X -координаты более равномерно, чем Y . Сортировка выполняется только один раз в самом начале, и нет необходимости ее повторять. Когда необходимо найти все точки в какой-то области, мы определяем коридор по X -координате (рис. 3, а). Крайний левый (iMin) и крайний правый (iMax) индексы можно получить очень быстро из отсортированного массива. Так

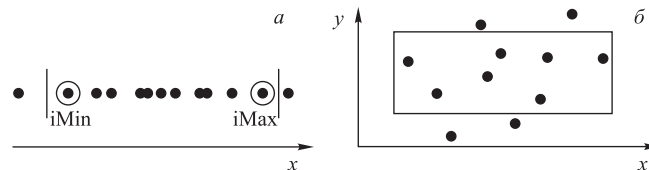


Рис. 3. Нахождение точек в заданной области

как массив отсортирован, остальные точки в коридоре лежат между двумя найденными индексами в массиве. Затем проверяются Y -координаты точек, попавших в коридор по X , чтобы удалить те из них, которые не попали уже в коридор по Y (рис. 3, б).

2.2.3. *Начальный поиск точек в локальной области.* Поиск начинается с первой точки в упорядоченном массиве, который используется для определения ориентировочного положения первого кольца. От этой точки задаем коридоры по X и Y , которые определяют максимально возможным диаметром кольца (D_{\max}), таким образом задаем локальную область поиска кольца (рис. 4). Используя алгоритм, описанный в подпункте 2.2.2, находим все точки, лежащие в данной области. Для того чтобы еще больше миними-

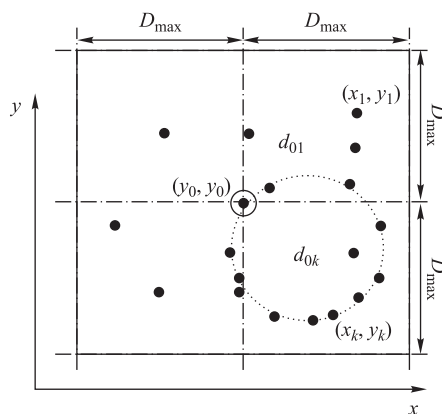


Рис. 4. Начальный поиск точек в локальной области

зировать количество точек, которые заведомо не могут принадлежать кольцу, считаем расстояние от начальной точки до всех точек в области, выбрасывая те из них, которые лежат дальше максимально возможного диаметра. Каждый раз поиск следующего кольца начинается со следующей точки в массиве, которая еще не была приписана к уже найденному кольцу, чтобы определить его приблизительное положение.

2.2.4. *Ускорение преобразования Хафа.* Далее по всем тройкам точек, используя формулы из подпункта 2.2.1, находим центры и радиусы колец, которые заносятся в гистограмму. Здесь следует отметить, что у кольца имеется три параметра, то есть необходима трехмерная гистограмма. Однако у этого подхода есть существенный недостаток — требуется слишком много памяти для ее хранения, а также процессорного времени для поиска пиков. В нашем алгоритме мы использовали две гистограммы: двумерную для центров колец (x - и y -координаты, рис. 5) и одномерную для радиусов. Отметим, что гистограмма также строится только в локальной области, благодаря этому она имеет небольшую размерность (15×15), что существенно снижает затраты памяти и времени при реализации алгоритма. Такой размер гистограмм был получен эмпирическим путем. Перед тем, как записать параметры в гистограммы, полученные значения параметров проверяются на границы, в случае, если значение хотя бы одного параметра не удовлетворяет границам, данное кольцо отбрасывается. Гистограммы центров и радиусов колец заполняются параллельно (рис. 6, 7). После перебора всех троек отсчетов в гистограмме центров ищем максимум, который должен быть больше специально подобранного порога. Если это не так, то данное кольцо отбрасывается. Далее в одномерной гистограмме радиусов также

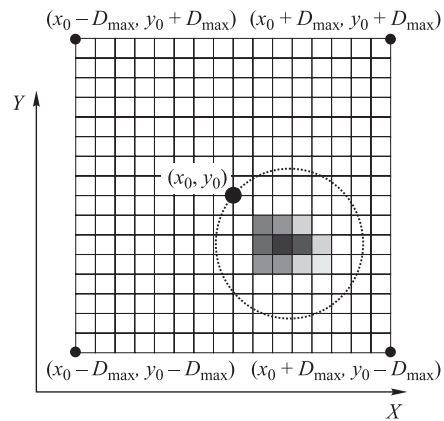


Рис. 5. Схематическая гистограмма центров колец. D_{\max} — максимально возможный диаметр кольца; x_0, y_0 — координаты начальной точки

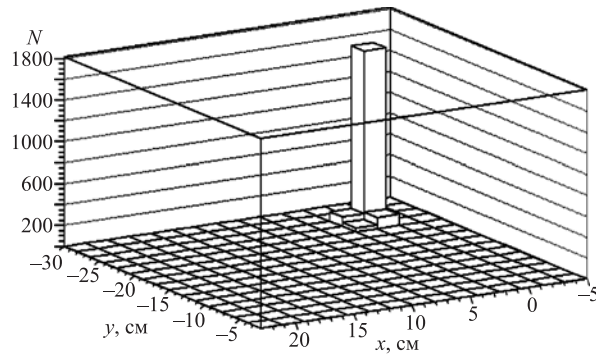


Рис. 6. Гистограмма центров колец для одного электронного кольца

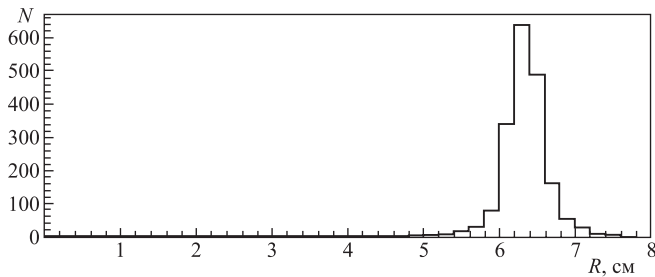


Рис. 7. Гистограмма радиусов колец для одного электронного кольца

находим максимум, который также должен быть выше порога (специальное исследование по выбору порогов в этих гистограммах описано ниже в п. 2.4). Положение максимума соответствует приблизительно значению радиуса (рис. 7).

На рис. 6 и 7 представлены гистограммы центров и радиуса для одного первичного (идущего из вершины) электрона.

2.2.5. Поиск точек, относящихся к данному кольцу. После оценки параметров кольца необходимо определить точки, которые следует ассоциировать с данным кольцом. Данная процедура выполняется в два этапа. Во-первых, во время гистограммирования считается, какой вклад внесла каждая точка в каждую ячейку гистограмм. Если для какой-то тройки точек мы посчитали параметры кольца и данные параметры занесли в гистограмму цен-

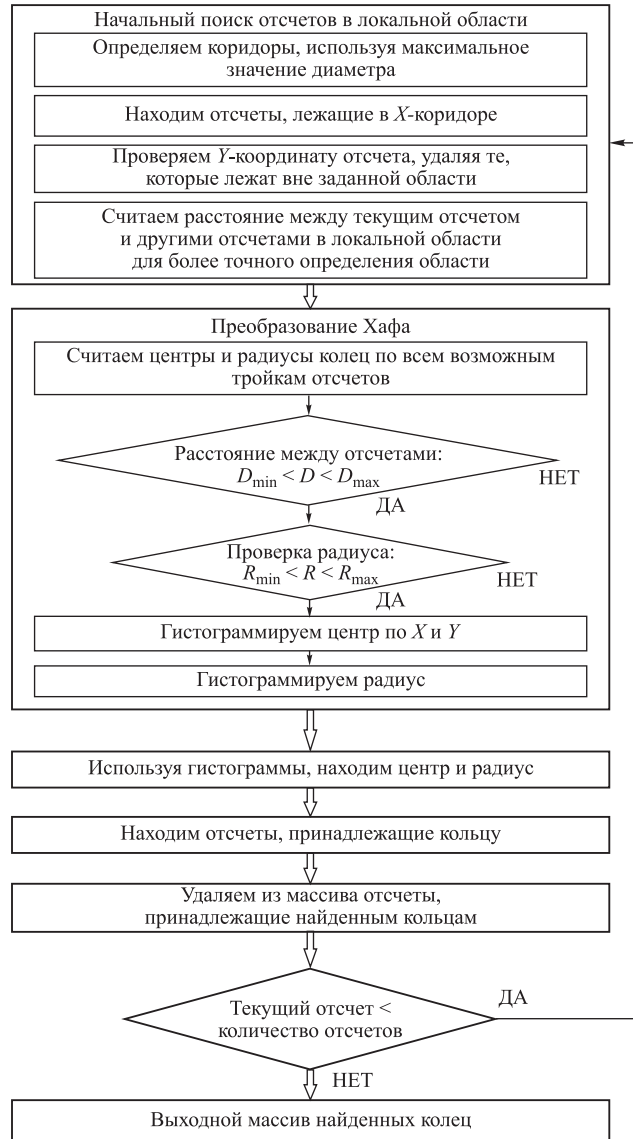


Рис. 8. Блок-схема алгоритма поиска колец

тров, в ячейку с индексами i и j , то для этой ячейки вклад каждой из трех точек увеличивается на единицу (то же самое делается и для гистограммы радиусов). После того как нашли пик в гистограмме, отбираются точки, вклад которых в ячейку с максимумом больше порогового значения. На этом предварительный отбор точек заканчивается.

На следующем этапе к данным точкам подгоняется окружность, так как полученные оценки координат центра и радиуса кольца являются достаточно грубыми (их точность определяется размерами ячеек гистограмм). Для подгонки мы используем алгоритм СОР [12], о котором вкратце рассказано ниже в разд. 4. Далее происходит формирование кольца путем выбора точек, которые лежат в определенном коридоре вокруг него. Коридор задается утроенным среднеквадратичным отклонением точек от окружности. Точки найденного кольца удаляются. Это позволяет избежать повторного поиска кольца, а также значительно ускорить алгоритм благодаря сокращению перебора.

2.3. Блок-схема алгоритма. На рис. 8 представлена блок-схема работы алгоритма.

2.4. Вычисление оптимальных пороговых значений. Тщательное изучение пороговых значений может существенно поднять эффективность. Главными порогами, которые определяют, найдено кольцо или нет, являются пороги на высоту пика в гистограмме центров окружностей и гистограмме радиусов. В работе [13] предлагалось, например, три варианта порогов: в зависимости от среднего числа колец и зашумленности события в качестве порогового значения бралось либо среднее значение ячеек гистограммы, либо треть от возможного числа триплетов при переборе, либо минимум от числа точек, воспользовались наличием адекватной модели событий в эксперименте СВМ, что давало возможность оптимизировать значения порогов на основе монте-карло-вычислений.

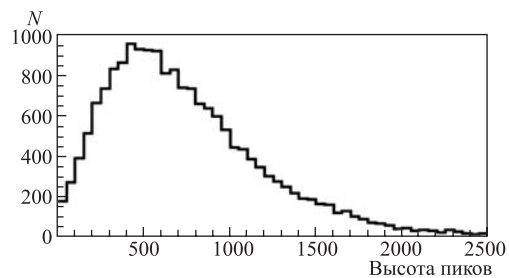


Рис. 9. Распределение высот пиков в гистограмме центров колец

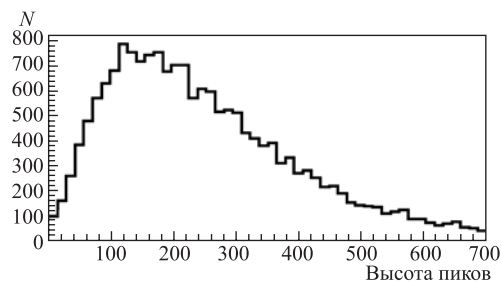


Рис. 10. Распределение высот пиков в гистограмме радиусов колец

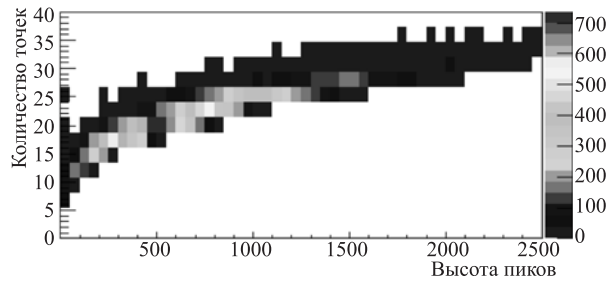


Рис. 11. Зависимость высоты пика в гистограмме центров колец от количества точек в кольце

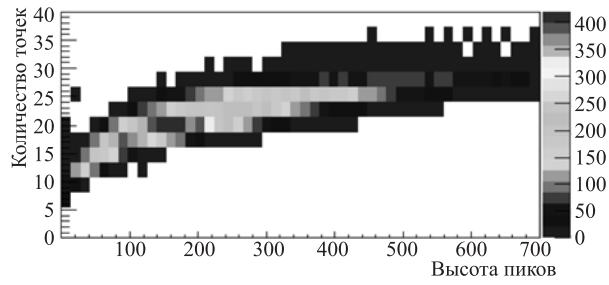


Рис. 12. Зависимость высоты пика в гистограмме радиусов колец от количества точек в кольце

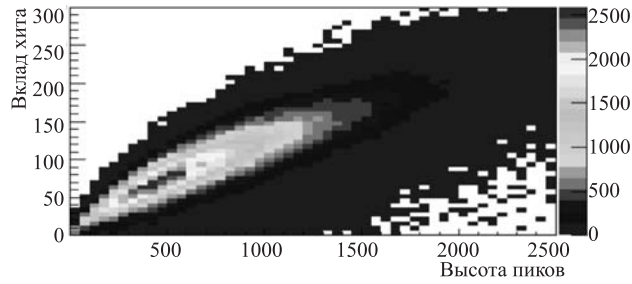


Рис. 13. Зависимость вклада хита от высоты пика в гистограмме центров колец

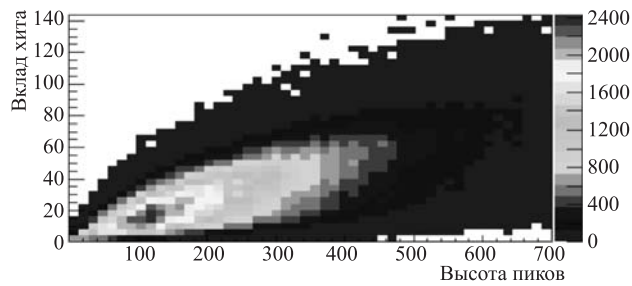


Рис. 14. Зависимость вклада хита от высоты пика в гистограмме радиусов колец

Во-первых, было посчитано, какая высота пиков получается в гистограммах для одного первичного электрона. Среднее значение пика в гистограмме центров равно 563, в гистограмме радиусов — 200 (рис. 9 и 10).

Также при отборе отсчетов для найденного кольца пороговое значение на вклад каждого отсчета зависит от высоты пика (рис. 11, 12). Данная зависимость представлена на рис. 13, 14. Используя плавающий порог, мы существенно подняли качество отбора отсчетов.

3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОЛЕЦ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1. Описание множества точек окружностью. Подгонка точек окружностью используется в алгоритме поиска колец. Основное требование к алгоритму — это высокая скорость работы при достаточно точном определении параметров. Нами используется алгоритм, известный в литературе как COP (Chernov–Ososkov–Pratt) [12, 14], который вкратце может быть описан следующим образом.

Подгонка точек окружности методом наименьших квадратов требует минимизация нелинейного функционала:

$$L(a, b, R) = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R \right)^2, \quad (1)$$

что приводит к необходимости использования программного пакета MINUIT, работа которого занимает много времени. Известен неитеративный метод [15], где вместо (1) предлагается минимизировать линеаризуемый функционал:

$$M(a, b, R) = \sum_{i=1}^n \left((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right)^2. \quad (2)$$

Нетрудно получить соответствие (1) и (2)

$$L(a, b, R) \approx M(a, b, R)/4R^2, \quad (3)$$

из которого следует, что при минимизации (2) в случае измерений, не покрывающих всю окружность, оценки параметров могут оказаться весьма далеки от их истинных значений.

Поэтому в алгоритме COP предлагается вместо функционала (1) минимизировать функционал (2), деленный на $4R^2$, т. е. минимизировать функционал:

$$\bar{M}(a, b, R) = \sum_{i=1}^n \left[\left((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right)^2 / 4R^2 \right]. \quad (4)$$

Это эквивалентно задаче подгонки точек окружностью функционалом (1), но программно реализуется гораздо проще, много быстрее и нет необходимости использовать программный пакет MINUIT. Программная реализация алгоритма COP, основанная на минимизации функционала (4) с использованием метода Ньютона для решения нелинейного уравнения с одной переменной, сходится всего за 3–4 итерации [16]. Алгоритм устойчив к начальным оценкам параметров окружности (это позволяет применять его, в

частности, и в задаче циркулярной подгонки треков частиц) и не теряет точности даже в случаях, когда начальная оценка центра окружности груба и может выходить за границы окружности. Благодаря этому в качестве начальной оценки центра окружности можно использовать, например, средние арифметические значения координат отсчетов, попавших в локальную область данного кольца.

3.2. Описание множества точек эллипсом. В процессе поиска колец необходимо более точно определить вид кривой для их описания. Так как кольца на плоскости фотодетектора из-за оптических искажений имеют эллиптическую форму, нами был предложен алгоритм эллиптической подгонки, использующий кеплеровское определение эллипсов, инвариантное к поворотам, как это предлагалось в [17]. Данный алгоритм позволил более точно определить параметры «колец», необходимые для идентификации электронов, в частности — центр кольца, что существенно улучшило стыковку с треками из вершинного детектора, а также улучшить разрешение по радиусу и, следовательно, получить улучшение в идентификации электронов и подавлении пионов. Кроме того, это дало возможность оценить зависимость угла поворота эллипса и угла, определяющего положение эллипса на плоскости фотодетектора, и таким образом разделить первичные и вторичные электроны, поскольку они пересекают RICH-детектор под разными углами.

Мы используем кеплеровское определение эллипса как геометрическое место точек, расстояние от любой из которых до двух фиксированных точек (фокусов $F_1(x_{F1}, y_{F1})$ и $F_2(x_{F2}, y_{F2})$) постоянно:

$$d_1 + d_2 = 2A,$$

где $d_1 = \sqrt{(x - x_{F1})^2 + (y - y_{F1})^2}$, $d_2 = \sqrt{(x - x_{F2})^2 + (y - y_{F2})^2}$. Определяя $\rho_i = d_1 + d_2 - 2A$, нам необходимо минимизировать

$$L(x_{F1}, y_{F1}, x_{F2}, y_{F2}, A) = \sum_{i=1}^n \rho_i^2 \Rightarrow \min_{x_{F1}, y_{F1}, x_{F2}, y_{F2}, A}.$$

Данный подход является нелинейным и приводит к необходимости итеративной минимизации, однако он обладает рядом важных преимуществ:

- Мы получаем эллипс без каких-либо ограничений на параметры, как это принято в задачах о подгонке конических сечений [14].
- Определяемые параметры $x_{F1}, y_{F1}, x_{F2}, y_{F2}, A$ инвариантны к сдвигу и повороту.
- Их просто пересчитать в пять базовых параметров эллипса A, B, x_c, y_c, φ , — большая и малая полуоси, координаты центра и угол поворота большой полуоси к оси абсцисс, — которые необходимы для физического анализа.
- Все эти параметры имеют одинаковую размерность, что важно при выборе шага в пространстве параметров во время итераций.

Мы используем программу MINUIT для минимизации функционала L . Начальные значения параметров задаются следующим образом: принимаем $A = 5$, затем считаем центр тяжести отсчетов $C(x_c, y_c)$ и получаем $x_{F1} = x_c - A/2$; $x_{F2} = x_c + A/2$; $y_{F1} = y_{F2} = y_c$.

После минимизации мы получаем параметры $x_{F1}, y_{F1}, x_{F2}, y_{F2}, A$, затем конвертируем их в необходимые физикам a, b, x_c, y_c, φ согласно формулам:

$$x_c = (x_{F1} + x_{F2})/2, \quad y_c = (y_{F1} + y_{F2})/2,$$

$$b = \sqrt{A^2 - \sqrt{(x_{F1} - x_{F2})^2 + (y_{F1} - y_{F2})^2}}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{y_{F2} - y_{F1}}{x_{F2} - x_{F1}}\right).$$

Алгоритм подгонки эллипсом был протестирован и показал интересные результаты. Было получено, что для текущей версии СВМ RICH-детектора большинство колец имеют эллиптическую форму с эксцентриситетом 0,43. Среднее значение большой полуоси равно 6,22, малой — 5,67, их отношение равно 0,91.

Кроме того, как показано ниже для первичных электронов была получена зависимость угла поворота эллипса и азимутального угла (рис. 15).

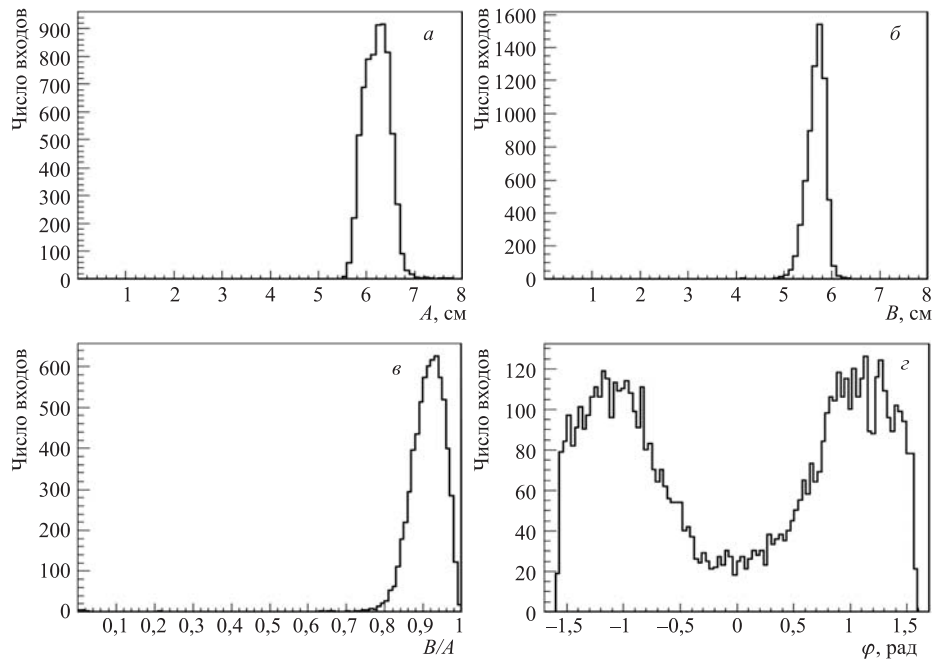


Рис. 15. Значения большой (а) и малой (б) полуосей, их отношение (в) и угол поворота (в, г) для первичных (т. е. вышедших из мишени) электронов

3.3. Коррекция параметров эллипса. Значения большой (A) и малой (B) полуосей эллипса зависят от положения на плоскости фотодетектора (рис. 16). Среднее значение A меняется от 5,8 на внешней части фотодетектора до 6,6 в центре плоскости фотодетектора, B меняется от 5,2 до 5,9. Из-за этой особенности разрешение по данным параметрам необходимо улучшить, так как они являются очень критичными при идентификации электронов и пионов. Для корректировки параметров нами разработан специальный алгоритм, основанный на карте коррекций (рис. 17).

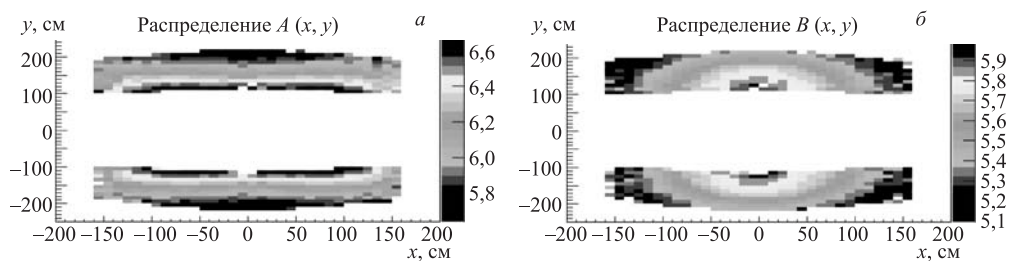


Рис. 16. Значения большой (a) и малой (b) полуосей эллипса в зависимости от их положения на плоскости фотодетектора

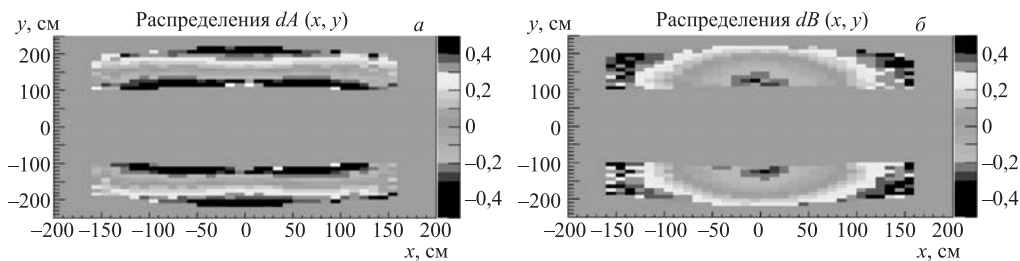


Рис. 17. Карты коррекции для большой (a) и малой (b) полуосей эллипса

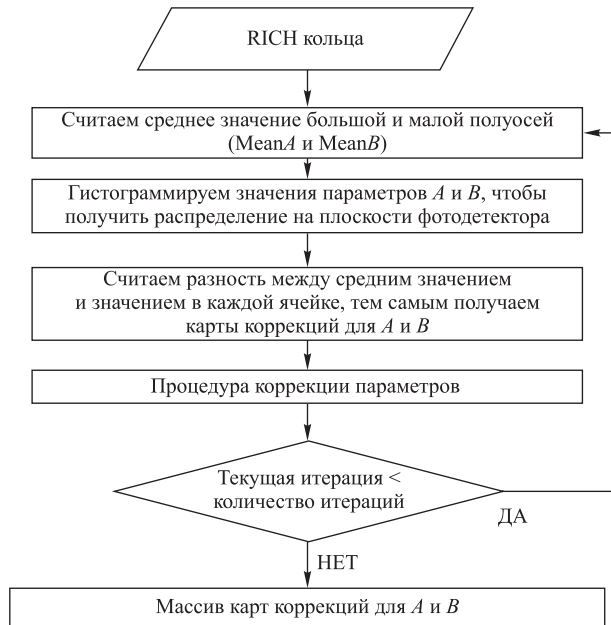


Рис. 18. Блок-схема работы карты коррекций

Для начала необходимо посчитать карту коррекций для каждого параметра отдельно. Данная процедура выполняется один раз и значения записываются в файл. Карты коррекций считаются следующим образом: 1) получаем среднее значение параметров A и B ; 2) гистографируем эти параметры, чтобы получить их усредненное распределение на плоскости фотодетектора; 3) на последнем этапе считаем разность между средним значением и значением каждой ячейки в гистограммах, тем самым получая новые гистограммы, которые и являются картами коррекций для A и B .

Во время реконструкции необходимо только определить ячейку, из которой взять значение поправки для параметра, затем прибавить ее к текущему значению.

Отметим, что при выполнении итеративной процедуры минимизации для оценки параметров эллипса карты коррекций считаются по такому же способу, только каждый раз необходимо делать поправки параметров от предыдущей итерации. Для каждой итерации считается своя карта коррекций. Блок-схема представлена на рис. 18.

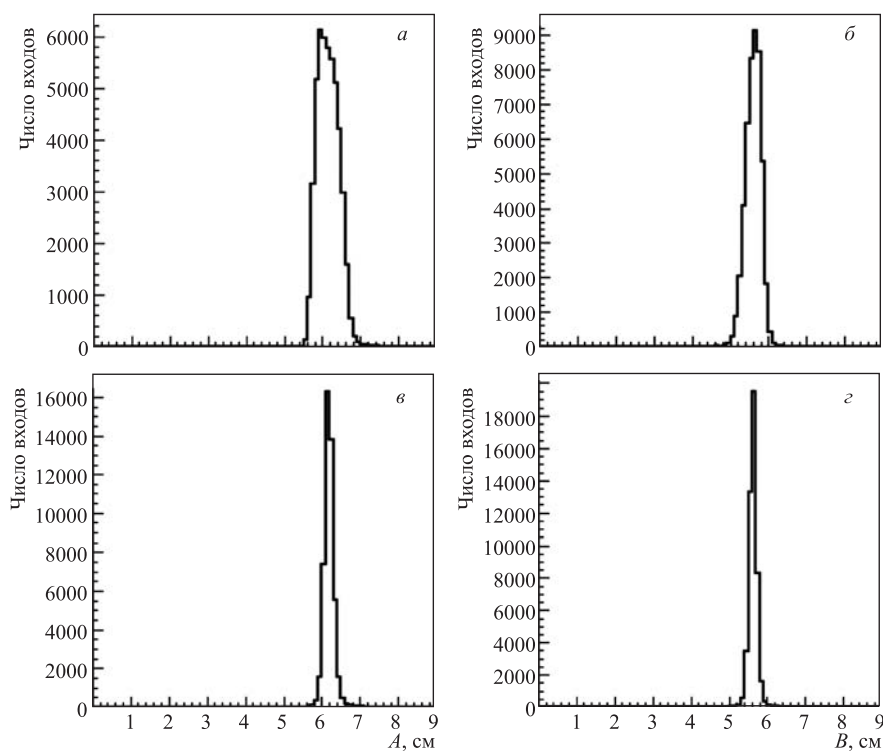


Рис. 19. Гистограммы большой ($a, в$) и малой ($б, г$) полуосей эллипса до ($a, б$) и после ($в, г$) коррекции

Результаты работы алгоритма представлены на рис. 19. Среднее значение дисперсии до корректировки для параметра A равно 0,27, для B — 0,20. После применения карты коррекций разрешение по обоим параметрам улучшилось почти в два раза.

4. СОГЛАСОВАНИЕ КОЛЕЦ И ТРЕКОВ

После реконструкции колец в RICH-детекторе каждое кольцо состыковывается с треком из вершинного детектора. Мы используем алгоритм, который для данного кольца

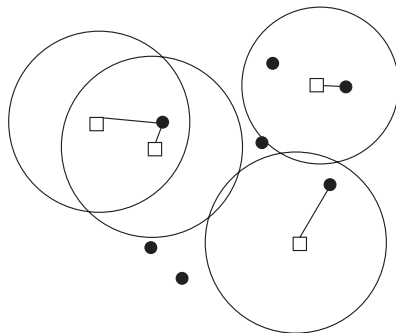


Рис. 20. Согласование колец с треками из вершинного детектора

ищет ближайший к нему трек. Если один и тот же трек является ближайшим для нескольких колец, то он ассоциируется с ними со всеми. Схематически алгоритм изображен на рис. 20. На нем черными кружками показаны проекции треков, а квадратами — центры колец.

5. УДАЛЕНИЕ ЛОЖНЫХ КОЛЕЦ

5.1. Выбор значимых характеристик колец. Алгоритм реконструкции колец находит не только хорошие кольца, соответствующие монте-карловским моделям, но и ложно найденные кольца, которые образуются случайной комбинацией отсчетов как следствие зашумленности от пересечения большого числа колец, порожденных не только первичными, но и вторичными частицами. Это приводит к необходимости искать пути для их отсева. Типичные ложные окружности получаются путем «воровства» точек у ближайших окружностей, как это показано на рис. 21.

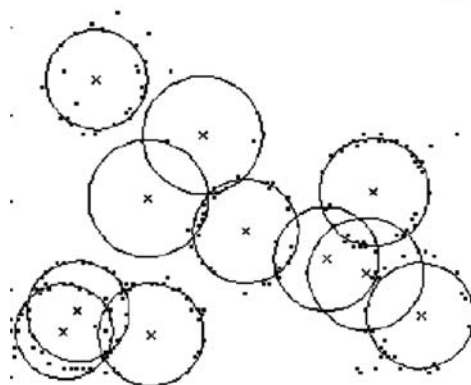


Рис. 21. Пример неправильно найденных колец

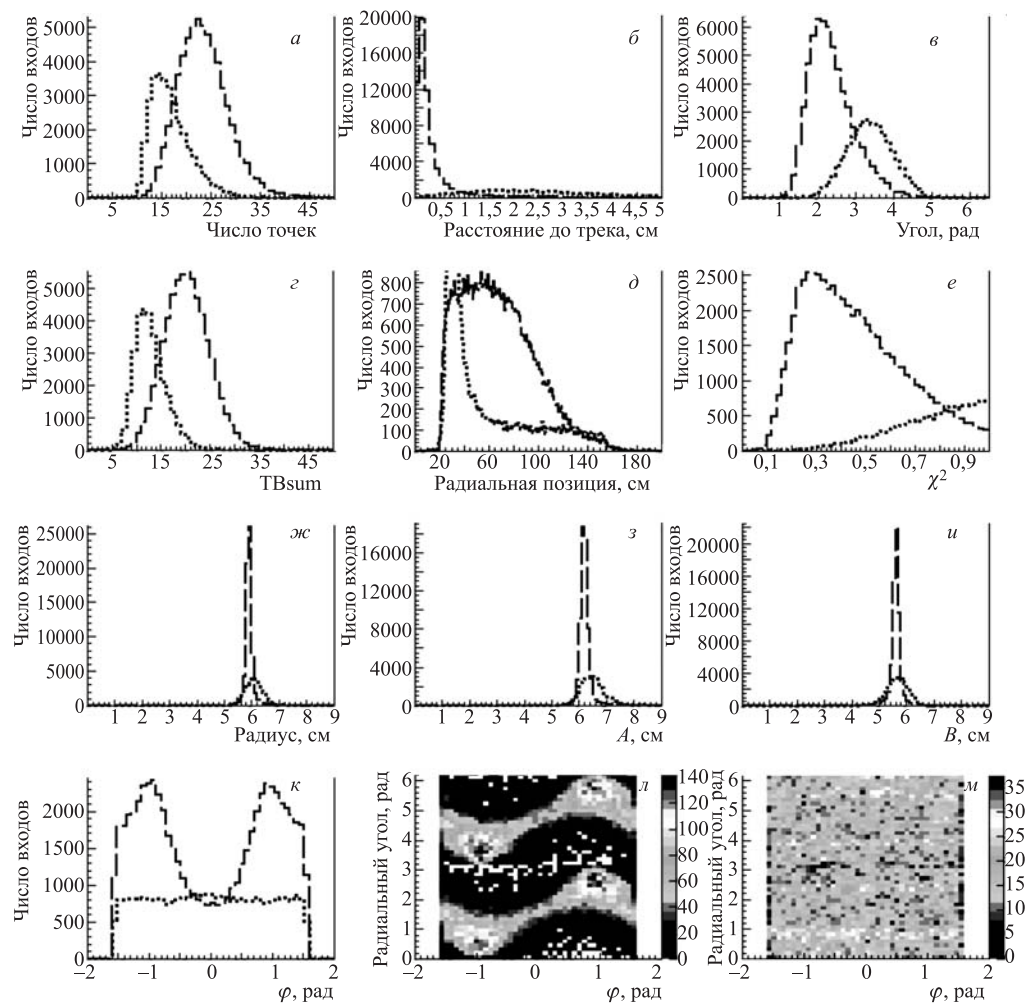


Рис. 22. Распределения параметров, выбранных для различия правильных и ложных колец

Одной из главных проблем являлось нахождение таких параметров окружности, которые можно было бы использовать для отсева ложных колец. Такие параметры должны как можно больше отличаться для ложных и правильно найденных окружностей. После тщательного статистического анализа были отобраны 10 таких параметров. На рис. 22 эти параметры показаны для

- правильно найденных колец от первичных электронов,
- неверно найденных, так называемых ложных колец.

Нами были выбраны следующие параметры:

- Количество отсчетов в найденном кольце. Из рис. 22, *a* видно, что правильно найденные электронные кольца имеют в среднем больше отсчетов, чем ложные кольца.

- Расстояние от центра кольца до ближайшей проекции трека. Большинство ложных колец расположены относительно далеко от треков.
- Сумма трех наибольших углов между соседними отсчетами. Типичной особенностью ложных колец является неравномерное распределение отсчетов на кольце. Эта неравномерность измеряется вычислением углов между соседними отсчетами и выбором трех максимальных углов (см. рис. 23, б).

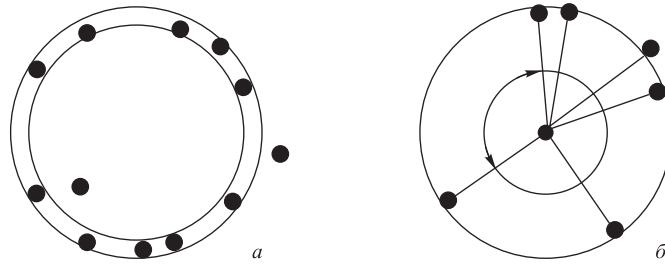


Рис. 23. Узкий коридор вокруг кольца и углы между соседними отсчетами

- Считается количество отсчетов, которые лежат в узком коридоре вокруг радиуса (см. рис. 23, а).
- Позиция на плоскости фотодетектора (радиальная позиция). Большое количество колец находится на внутренней части фотодетектора из-за большой плотности точек и колец в этой области. Радиальная позиция определяется следующим образом: для верхней части фотодетектора она равна $\text{rad pos} = \sqrt{x_{\text{center}}^2 + (y_{\text{center}} - 110)^2}$, для нижней части $\text{rad pos} = \sqrt{x_{\text{center}}^2 + (y_{\text{center}} + 110)^2}$.
- Критерий χ^2 эллиптической подгонки. Для эллипса χ^2 определяется как

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (d_{1i} + d_{2i} - 2A)}{N - 5},$$

где $d_{1i} = \sqrt{(x_i - x_{F1})^2 + (y_i - y_{F1})^2}$, $d_{2i} = \sqrt{(x_i - x_{F2})^2 + (y_i - y_{F2})^2}$. x_{F1} , y_{F1} , x_{F2} , y_{F2} — координаты фокусов, и x_i , y_i — координаты i -го отсчета, N — это количество отсчетов.

- Большая (A) и малая (B) полуоси эллипса.
- Угол поворота эллипса ϕ относительно оси абсцисс и азимутальный угол, который определяет позицию эллипса на плоскости фотодетектора. Из рис. 22, k -м видна четкая зависимость ϕ и азимутального угла для правильных колец, а для ложных колец нет никакой зависимости, распределение равномерное.

5.2. Нейронная сеть. Как показало предыдущее исследование [11] по применению пороговых процедур для удаления ложных колец как для одномерных, так и попарных двумерных распределений выбранных параметров, невозможно достичь приемлемых результатов при сохранении эффективности, поэтому необходимо применение более сложных многопараметрических методов. Поэтому для задачи классификации колец мы применили искусственную нейронную сеть (ИНС). По вышеописанным десяти входным параметрам необходимо определить, является ли кольцо найденным правильно или ложно.

В качестве ИНС был использован многослойный перцептрон из программного пакета ROOT [17]. Сеть состоит из трех слоев. Количество входных нейронов в первом слое соответствует количеству описанных выше параметров. Количество нейронов в скрытом слое на основе проведенного исследования выбирается как удвоенное число входных нейронов, а выходной нейрон один. Для обучения нейронной сети использовалась обучающая выборка из 3000 ложных и 3000 правильных колец, сгенерированная методом Монте-Карло с помощью программ [10], в которой полагалось, что для ложных колец выходной сигнал равен -1 , а для правильно найденных $+1$.

При применении нейросети после обучения значение ее выходного нейрона уже не бинарное, а принимает различные значения (см. рис. 24, где абсцисса соответствует выходным значениям ИНС): для ложных колец эти значения лежат в районе -1 , для правильных — в районе $+1$. Таким образом, возникает необходимость выбора такого порога, чтобы он обеспечивал максимальный процент подавления ложных колец, но при важном ограничении: *выбранный порог должен обеспечивать заданную величину общей эффективности обнаружения колец.*

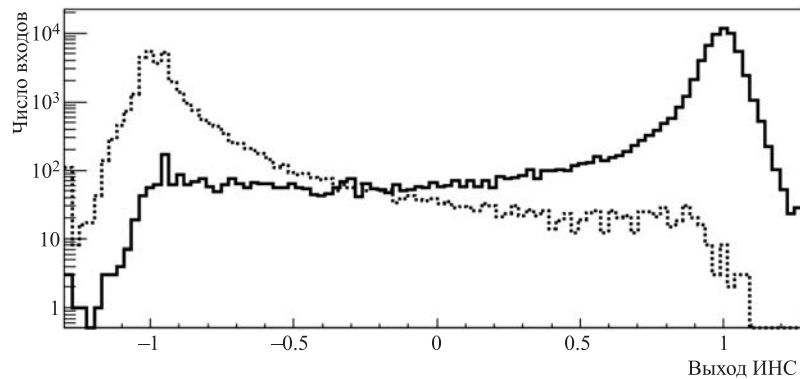


Рис. 24. Распределение выходных значений ИНС для ложных (пунктирная линия) и правильно найденных (сплошная) колец (логарифмическая шкала)

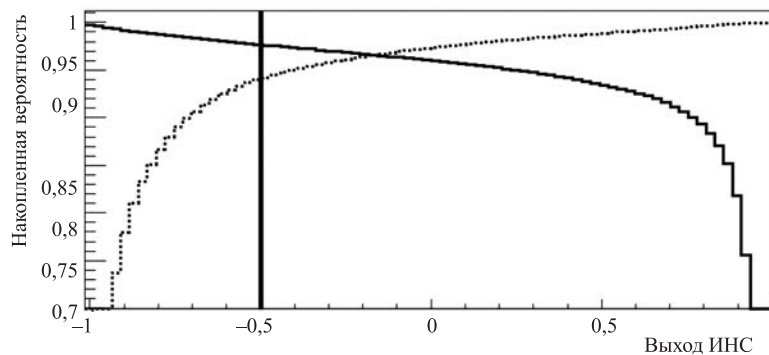


Рис. 25. Накопленная вероятность выхода ИНС для ложных (пунктирная линия) и правильно найденных (сплошная) колец

Соответствующее значение порога $-0,5$ для $97,5\%$ эффективности было получено из зависимости, представленной на рис. 25.

Результаты вычислений по отсеву ложных колец приведены ниже в п. 7.2.

6. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Основной задачей в детекторе RICH является идентификация электронов и подавление пионов. Для решения этой задачи мы также использовали преимущества искусственной нейронной сети.

Естественно, что в этой задаче мы выбрали другие входные параметры для ИНС в сравнении с отсевом ложных колец. Изучив распределения различных параметров для пионов и первичных электронов, мы выбрали семь параметров, показанных на рис. 26 для:

- первичных электронов,
- пионов.

Параметры следующие:

- Большая и малая полуось (A и B) (см. рис. 26, *a, б*).
- Импульс. Импульс является очень важным параметром, так как радиус пионных колец зависит от импульса, а для электронных колец он почти постоянный. На рис. 26, *д, e* показана зависимость B от импульса для электронов (слева) и пионов (справа). Здесь следует отметить, что импульс берется из состыкованного с кольцом трека (см. разд. 4). Около 3% колец состыковываются неверно, что отчетливо видно на рис. 26, *e*): когда некоторые кольца от пионов с импульсом более $8-9$ ГэВ/ c неверно состыковались треком с меньшим импульсом, отсюда и получается левая часть гистограммы (рис. 26, *e*). Алгоритм идентификации должен справляться и с такой ситуацией. Отсутствие пионных колец с маленькими радиусами закономерно, так как большинство из них отсеялось благодаря алгоритму удаления ложных колец.
- Критерий Хи-квадрат, рис. 26, *в*).
- Радиальное положение. Большинство пионов, которые образуют кольца, являются высокоэнергетическими (порог для пионов $5,6$ ГэВ/ c), следовательно, они расположены на внутренней, ближней к пучку, части фотодетектора (рис. 26, *з*).
- Угол поворота эллипса ϕ и радиальный угол. И снова на рис. 26, *ж, з* явно видна периодическая зависимость ϕ и радиального угла для первичных электронов, в то время как для пионов это распределение случайное.

Использовался многослойный перцептрон из программного пакета ROOT [10]. Сеть состоит из трех слоев. Количество нейронов в первом слое равно семи, и соответствует количеству описанных выше параметров. Количество нейронов в скрытом слое — удвоенное число входных нейронов, а единственный выходной нейрон принимал в процессе обучения значение -1 при подаче на вход параметров, соответствующих кольцам от пионов, а в случае первичных электронов выходной сигнал принимал значение $+1$. Для обучения нейронной сети использовалась монте-карловская выборка из 3000 пионов и 3000 первичных электронов. Выбор порога для получения значений выходного нейрона ИНС проводился по результатам вычисления эффективности классификации, приведенным ниже в таблице п. 7.4.

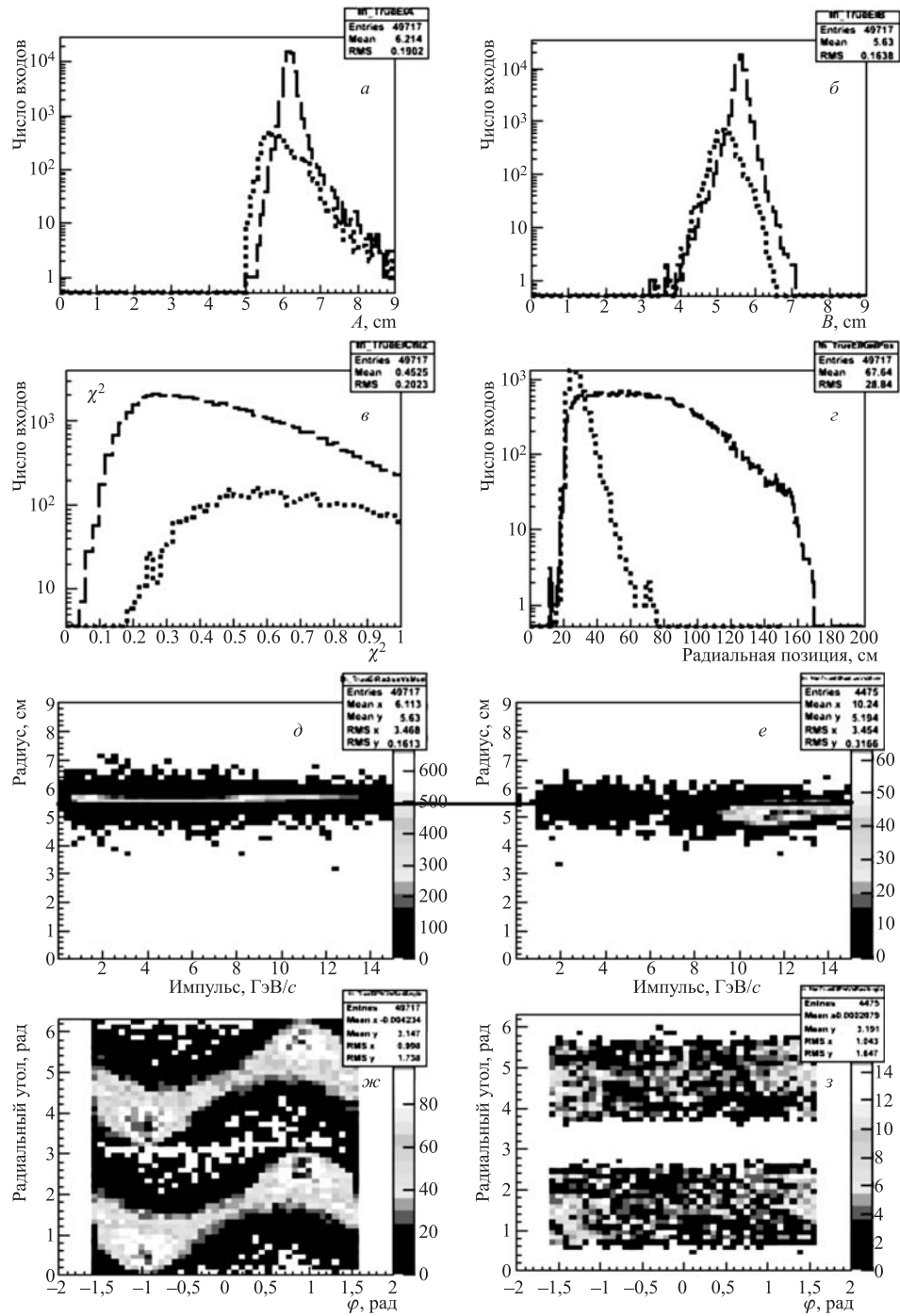


Рис. 26. Параметры, выбранные для различия первичных электронных и пионных колец

Результаты применения данного подхода в зависимости от порога на выходное значение ИНС показаны в разд. 7.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

В этом разделе представлены результаты алгоритма распознавания колец, а также алгоритма отсева ложных колец с использованием ИНС.

Эффективность и качество найденных колец можно определить, используя монте-карло-информацию: ложными кольцами определяются те, у которых менее 60 % отсчетов принадлежат одному монте-карло-кольцу. Для всех правильно найденных колец монте-карло-информация позволяет проверить правильность стыковки с треками из вершинного детектора.

Эффективность поиска колец можно классифицировать по трем параметрам:

- Эффективность нахождения колец от первичных электронов определяется как

$$\text{eff} = \frac{N_{\text{rec}}}{N_{\text{ac}}},$$

где N_{rec} — количество правильно найденных электронных колец (у которых более 60 % точек соответствуют одному монте-карло-кольцу); N_{ac} — количество колец от первичных электронов с количеством отсчетов более пяти в RICH.

- Количество ложно найденных колец на событие.
- Количество клонов. Клоном считается кольцо, которое было найдено более одного раза.

Для представленных результатов мы использовали 8000 центральных Au–Au-столкновений при 25A ГэВ (добавлены $5e^+$ и $5e^-$ с равномерным (θ, p_t, ϕ) распределением для улучшения статистики первичных электронов).

7.1. Эффективность поиска колец. Эффективность поиска колец от первичных электронов в зависимости от импульса показана на рис. 27. Средняя эффективность равна 93,63 %, среднее количество ложных колец на событие равно 4,0, количество клонов — 0,17.

7.2. Эффективность отсева ложных колец. После поиска колец был применен алгоритм для отсева ложных колец. Эффективность поиска колец, включающая использование нейронной сети с пороговым значением $-0,5$, показана на рис. 28 в зависимости

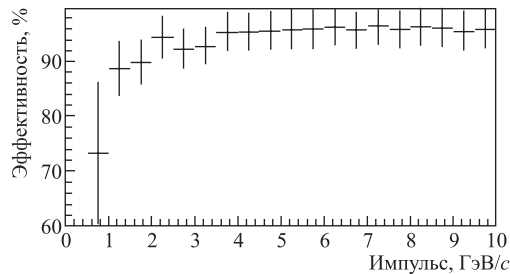


Рис. 27. Эффективность поиска колец от первичных электронов в зависимости от импульса (алгоритм для отсева ложных колец не применялся)

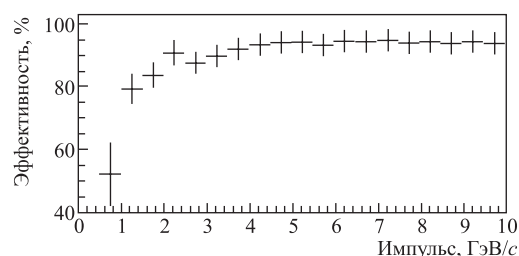


Рис. 28. Эффективность поиска колец от первичных электронов в зависимости от импульса (применялся алгоритм для отсева ложных колец с порогом $-0,5$)

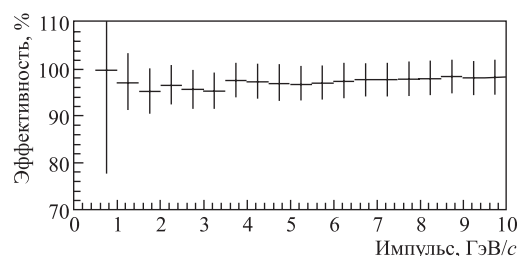


Рис. 29. Эффективность стыковки колец и треков в зависимости от импульса

от импульса. Средняя эффективность равна $90,92\%$, среднее количество ложных колец, оставшихся после отсева, составляет $0,29$ на событие, количество клонов — $0,04$. Сравнивая эти цифры с теми, которые были даны в предыдущей части, можно сказать, что применение ИНС дало следующие результаты:

- на $2,71\%$ упала эффективность,
- в $13,7$ раз меньше ложных колец,
- в $4,25$ раз меньше клонов.

7.3. Эффективность согласования колец и треков. Средняя эффективность согласования колец и треков равна $97,78\%$.

7.4. Эффективность идентификации электронов и подавления пионов. Результаты применения ИНС для идентификации электронов и подавления пионов показаны в сводной таблице. Отметим, что применение простого порога на радиус кольца дает подавление на уровне $(1-5) \cdot 10^{-3}$ [9].

Сводная таблица результатов идентификации электронов

Порог ИНС	$-0,3$	$-0,4$	$-0,5$	$-0,6$	$-0,7$
Подавление пионов	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$
Электроны, идентифицированные как пионы, %	2,98	2,3	1,8	1,3	0,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны быстрые и эффективные алгоритмы для обработки данных в детекторе RICH эксперимента CBM. Поиск колец основан на быстром преобразовании Хафа с предварительным отбором отсчетов. Одно событие (более 100 колец) распознается за 0,05 с. Для точного определения параметров разработаны алгоритмы подгонки отсчетов эллипсом и вычисления карты коррекций параметров эллипса. Для удаления ложных колец и идентификации электронов применялись искусственные нейронные сети, показавшие высокую эффективность.

Все разработанные алгоритмы включены в программную оболочку эксперимента и широко используются для физического анализа.

Дальнейшие исследования предполагается вести по линии ускорения алгоритмов эллиптической подгонки колец путем разработки специального быстрого алгоритма и отказа от использования программы MINUIT.

Авторы выражают свою признательность доктору Клаудии Хене (GSI, Дармштадт, Германия) и Александру Айрияну за многочисленные плодотворные обсуждения и ценные замечания, а также проф. В. В. Иванову за постоянную поддержку и интерес к проведенным исследованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бок Р. и др. Методы анализа данных в физическом эксперименте. М.: Мир, 1993.
2. Ососков Г. А., Полянский А., Пузынин И. В. Современные методы обработки экспериментальных данных в физике высоких энергий // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33, вып. 3. С. 676–745.
3. Никитин В. А., Ососков Г. А. Автоматизация измерений и обработки данных физического эксперимента. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1986. 182 с.
4. Кисель И. В., Нескоромный В. Н., Ососков Г. А. Применение нейронных сетей в экспериментальной физике // ЭЧАЯ. 1993. Т. 24, вып. 6. С. 1551–1595.
5. CBM Collab. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report GSI. Darmstadt, 2005; <http://www.gsi.de/documents/DOC-2005-Feb-447-1.pdf>
6. Hough P. V. C. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns. US Patent: 3, 069, 654. 1962.
7. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Ber. Ver. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig. Math.-Phys. Kl. 1917. Bd. 69. S. 262–277.
8. Toft P. The Radon Transform. Theory and Implementation. Ph. D. Thesis. Tech. Univ. of Denmark, 1996; <http://www.ei.dtu.dk/staff/ptoft/ptoft.html>
9. CBM Progress Report 2007. GSI. Darmstadt, 2008; <http://www.gsi.de/documents/DOC-2008-May-3-1.pdf>
10. <http://cbmroot.gsi.de>
11. Lebedev S., Ososkov G., Hoehne C. Ring Recognition in the CBM RICH Detector. JINR Commun. E10-2007-88. Dubna, 2007.

12. *Chernov N., Ososkov G.* Effective Algorithms for Circle Fitting // *Comp. Phys. Commun.* 1984. V.33. P.329–333.
13. *Pratt V.* Direct Least-Squares Fitting of Algebraic Surfaces // *Comp. Graphics.* 1987. V. 21. P. 145–152.
14. *Muresan L. et al.* Deformable Templates for Circle Recognition // *JINR Rapid Commun.* 1997. No. 1[81]. P.27–44.
15. *Crawford J. F.* A Non-Iterative Method for Fitting Circular Arcs to Measured Points // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. V. 211. P. 223–225.
16. *Айриян А. С. и др.* Быстрые алгоритмы оценки параметров колец черенковского излучения в детекторах типа RICH // *Вестн. Тверск. гос. ун-та. Прикладная математика.* 2007. Т. 45, №17. С. 15–26.
17. *Chernov N., Ososkov G., Silin I.* Robust Fitting of Ellipses to Non-Complete and Contaminated Data // *Czech. J. Phys.* 2000. V. 50, Suppl. S1. С. 347–354.
18. <http://root.cern.ch>

Получено 29 мая 2008 г.