

P10-2001-182

А.А.Бельков

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАФА
ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТРЕКОВ
В ДРЕЙФОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ**

Современные трековые системы представляют собой многослойные дискретные структуры, состоящие из множества элементарных устройств, каждое из которых способно регистрировать проходящие через него заряженные частицы. В реальных условиях работы трековых детекторов при высоких нагрузках поиск траекторий частиц и определение их параметров в трековых детекторах усложняются наличием неработающих (мертвых) зон, шумов и искажений сигналов. В результате поиск треков непосредственно в пространстве координатных измерений детектора зачастую становится неоптимальным с точки зрения качества определения параметров и времени обработки событий.

Поэтому в физике частиц широкое распространение получили глобальные алгоритмы распознавания образов, среди которых особое место занимает преобразование Радона–Хафа [1 – 3], основанное на переводе измерений из пространства координат детектора (пространства образов) в пространство параметров трека частицы (пространство признаков). Если поиск ведется в части трекового детектора, находящегося вне магнита, а многократным рассеянием можно пренебречь, то в этом случае при описании трека на стадии его распознавания можно ограничиться уравнением прямой линии.

В настоящее время широкое распространение получили высокоточные дрейфовые камеры, которые, в отличие от пропорциональных, кроме координат сработавшей проволоки позволяют также измерять время дрейфа электронов первичной ионизации до проволоки и тем самым определять расстояние от нее до ближайшей точки траектории, если известна зависимость расстояния от времени дрейфа $r(t)$. При этом остается неизвестным, с какой стороны (справа или слева) от проволоки прошла частица. Эта проблема получила название право-левой неопределенности, которая обычно разрешается в процессе фитирования измерений, отнесенных к данному треку.

Слои дрейфовых камер с параллельными проволоками обеспечивают реконструкцию лишь одной проекции трека в плоскости, ортогональной проволокам. Для пространственной реконструкции требуются по крайней мере две различные проекции. Поэтому дрейфовый трековый детектор имеет несколько чередующихся стереослоев, повернутых друг относительно друга на определенный угол.

Особый интерес представляет учет в преобразовании Хафа как координат сработавших проволок, так и расстояний дрейфа — задача, которая до сих пор не была успешно решена ни в одной из работ опубликованных до настоящего момента из-за большого времени обработки событий, превышающего почти на три порядка время, затрачиваемое при использовании альтернативных методов распознавания треков. Другая не менее интересная задача — это применение преобразования Хафа не только к измерениям в одной проекции, но и в повернутых стереослоях.

В данной работе рассмотрено использование преобразования Хафа в задаче пространственного распознавания прямолинейных треков в системе взаимно повернутых стереослоев дрейфовых камер. Предложенный в работе метод позволяет, при приемлемом времени обработки события, эффективно разрешать право-

левую неопределенность и с хорошей точностью определять параметры прямолинейных треков в пространстве при высоком уровне загрузки детектора и большом числе неэффективно работающих каналов регистрации.

1. РАСПОЗНАВАНИЕ ПРОЕКЦИИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ТРЕКА С ПОМОЩЬЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАФА

1.1. Хаф-образ единичного измерения в проволочном детекторе

Рассмотрим проекцию прямолинейного трека на горизонтальную плоскость XZ в системе координат, изображенной на рис. 1а. Проекция трека описывается уравнением

$$x(z) = x_0 + t_x(z - z_0), \quad (1)$$

где x_0 — смещение начала проекции при некотором фиксированном положении $z = z_0$; $t_x = \operatorname{tg} \theta_x$ — наклон проекции. Тогда пространством параметров проекции трека P_x является прямоугольник $x_0 \in [x_0^{\min}, x_0^{\max}]$, $t_x \in [t_x^{\min}, t_x^{\max}]$ на двумерной плоскости x_0, t_x (см. рис. 1б). Прямой линии в пространстве координат детектора XZ отвечает точка в пространстве параметров P_x .

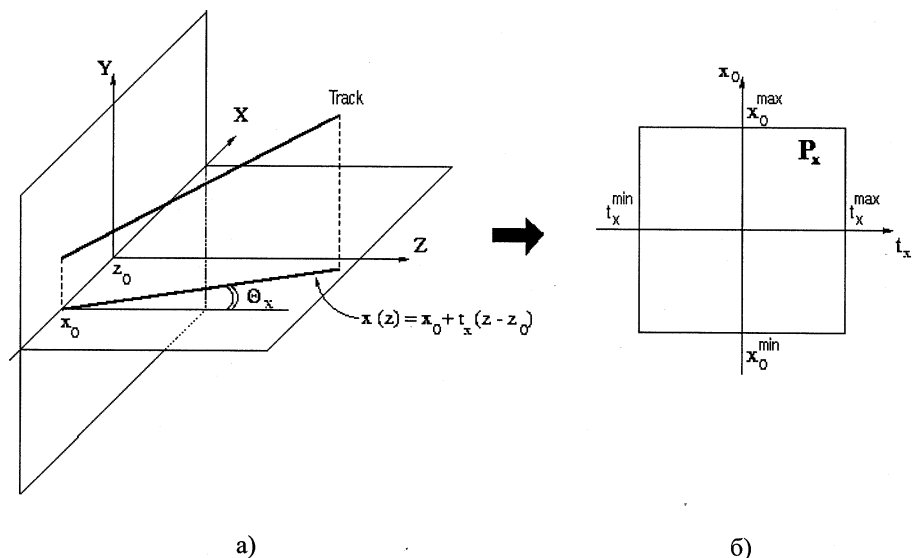


Рис. 1. Пространство координат детектора (а) и пространство параметров x_0, t_x (б), описывающих проекцию трека на плоскость XZ

Пусть проекция трека (1) регистрируется системой цилиндрических проволочных газовых камер, состоящих из трубок радиуса R , расположенных так, чтобы их анодные проволоки, натянутые вдоль осей трубок, были параллельны вертикальной оси Y . В этом случае сигналы с проволочных камер дают информацию о проекции трека (1) на горизонтальную плоскость XZ . Рассмотрим работу камер в двух режимах — пропорциональном, когда известна только координата сработавшей проволоки в плоскости XZ (*модель 1*), и дрейфовом, когда по времени дрейфа электронов ионизации измеряется расстояние между треком и сработавшей проволокой (*модель 2*).

1.2. Модель 1: пропорциональные камеры

Пусть C_i — круг радиуса R на плоскости XZ с центром на сработавшей i анодной проволоке. Тогда хаф-образ единичного измерения с i проволоки есть множество M , принадлежащее подпространству параметров трека P_x , такое, что для всех точек из M соответствующие им треки проходят через круг C_i радиуса R с центром (x_i, z_i) в сработавшей проволоке. При фиксированном значении t_x границы множества M определяются уравнением для касательных к кругу C_i , проведенных под углом θ_x (см. рис. 2а):

$$x_0(t_x) = x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x \pm R\sqrt{1 + t_x^2}.$$

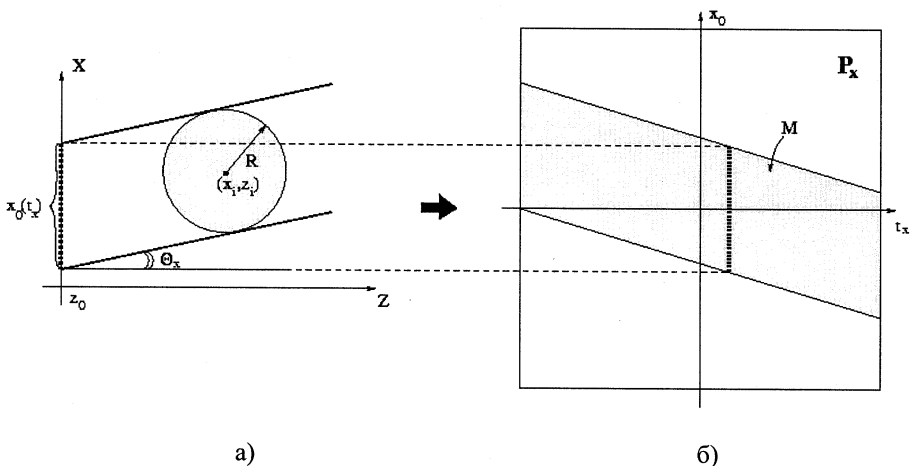


Рис. 2. а) Единичное измерение с проволоки пропорциональной камеры с координатой (x_i, z_i) в пространстве координат проекции трека. б) Хаф-образ единичного измерения в пространстве параметров проекции трека

Таким образом, при каждом значении t_x , хаф-образ единичного измерения задается отрезком возможных значений x_0 :

$$x_0 \in [x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x - R\sqrt{1+t_x^2}; x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x + R\sqrt{1+t_x^2}]. \quad (2)$$

Соответствующая полоса значений $(x_0, t_x) \in M$ показана на рис. 2б.

1.3. Модель 2: дрейфовые камеры

В этом случае дополнительно известно расстояние r_i от анодной проволоки до трека. Будем считать, что измерение r_i содержит ошибку, равномерно распределенную по отрезку $[-c, c]$, где $c \approx 2 + 3\sigma$ является параметром алгоритма, а σ — пространственное разрешение дрейфовой камеры. Тогда хаф-образ единичного измерения с i проволоки есть множество M , принадлежащее подпространству параметров трека P_x , такое, что для всех точек из M соответствующие им треки проходят через кольцо R_i с внешним/внутренним радиусом $R^\pm = r_i \pm c$ и центром (x_i, z_i) в сработавшей проволоке. При фиксированном значении t_x границы множества M определяются уравнением для касательных к кольцу R_i , изображенных на рис. 3а:

$$x_0(t_x) = x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x \pm (r_i \pm c)\sqrt{1+t_x^2}.$$

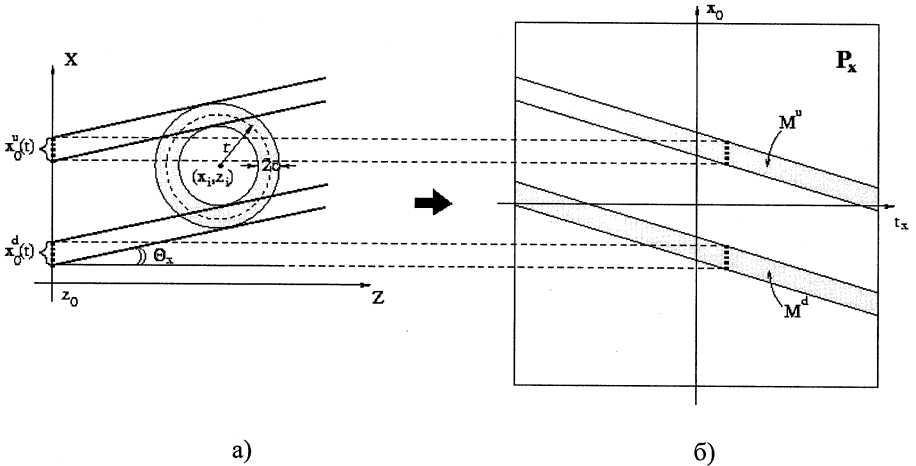


Рис. 3. а) Единичное измерение в дрейфовой ячейке с координатой (x_i, z_i) сработавшей проволоки в пространстве координат проекции трека. б) Хаф-образ единичного измерения в пространстве параметров проекции трека с учетом расстояния дрейфа r

Таким образом, при каждом значении t_x хаф-образ единичного измерения задается двумя отрезками возможных значений x_0 :

$$x_0 \in [x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x + (r_i - c)\sqrt{1 + t_x^2}; x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x + (r_i + c)\sqrt{1 + t_x^2}] \quad (3)$$

— верхняя ветвь (M^u),

$$x_0 \in [x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x - (r_i + c)\sqrt{1 + t_x^2}; x_i - (z_i - z_0) \cdot t_x - (r_i - c)\sqrt{1 + t_x^2}] \quad (4)$$

— нижняя ветвь (M^d).

Наличие двух полос $M^{u/d}$ на рис. 36 для хаф-образа единичного измерения отражает существование проблемы право-левой неопределенности при измерении положения трека заряженной частицы относительно проволоки в ячейке дрейфовой камеры.

1.4. Хаф-образы последовательности измерений и взвешивающий алгоритм определения параметров трека

Пусть M_1, M_2, \dots, M_n — хаф-образы отдельных измерений на n сработавших проволоках. Тогда хаф-образ последовательности измерений $\{M_k\}$, $k = 1, \dots, n$ есть пересечение хаф-образов отдельных измерений:

$$M_{1n} = \bigcap_{k=1}^n M_k. \quad (5)$$

Частный случай $M_{1n} = 0$ отвечает ситуации, когда измерения, порождающие M_{1n} , оказываются несовместными в смысле модели трека. Если $M_{1n} \neq 0$, то существует множество треков, которые могли бы породить соответствующие измерения.

Введем критерий достоверности трека $J(M)$, который определим как количество измерений, породивших множество M в результате пересечения хаф-образов единичных измерений. Алгоритм отбора достоверных треков включает в себя упорядочение множеств M в соответствии с критерием $J(M)$. Для реконструкции используются только те множества M , для которых $J(M) \geq J_{min}$, где пороговое значение J_{min} является параметром алгоритма. Если множество M найдено, тогда параметры трека x_0 , t_x оцениваются при помощи взвешивающего алгоритма:

$$\hat{x}_0 = \frac{\int_M x_0 dx_0 dt_x}{\int_M dx_0 dt_x}, \quad \hat{t}_x = \frac{\int_M t_x dx_0 dt_x}{\int_M dx_0 dt_x}. \quad (6)$$

Таким образом, задача поиска проекций прямолинейных треков на горизонтальную плоскость XZ по измерениям в проволочных газовых камерах с расположенными вертикально трубками сводится к поиску областей с максимальным числом пересечений хаф-образов одиночных измерений в пространстве параметров x_0, t_x . Пространство параметров проекции трека P_x можно представить в виде дискретного растра, каждая ячейка которого может принимать целочисленное значение. Сначала значения всех ячеек растра зануляются. Затем на этом растре последовательно строятся полосы, соответствующие хаф-образам отдельных измерений: текущее значение ячейки растра увеличивается на единицу, если ячейка лежит в пределах, задаваемых соотношениями (2) или (3) и (4). После завершения этой процедуры значение каждой ячейки растра становится равным числу прошедших через нее хафовских полос. Каждый локальный максимум на растре, превышающий некоторый порог J_{min} , может быть отождествлен с проекцией прямолинейного трека с соответствующим значением параметров x_0, t_x .

2. УЧЕТ НАКЛОННЫХ ПРОВОЛОК В СТЕРЕОСЛОЯХ

В предыдущем разделе было рассмотрено распознавание проекции прямого трека в плоскости XZ , перпендикулярной проволочкам дрейфовых камер (см. рис. 1). Для восстановления 3-мерной пространственной картины необходимо также восстановить проекцию трека на вертикальную плоскость YZ :

$$y'(z) = y_0 + t_y(z - z_0), \quad (7)$$

где y_0 и $t_y = \operatorname{tg} \theta_y$ — параметры проекции прямого трека. С этой целью в экспериментах используются стереослои дрейфовых камер, повернутых на различные углы относительно вертикали. Рассмотрим систему дрейфовых камер, состоящих из стереослоев двух типов:

- дрейфовые камеры с проволоками, параллельными оси Y (стереослой “0”),
- дрейфовые камеры с проволоками, расположенными под углом α по отношению к оси Y в плоскости, параллельной плоскости XY (стереослой “ α ”).

Пусть в системе координат XYZ , изображенной на рис. 4, прямой трек заряженной частицы описывается уравнениями (1), (7) для проекций на плоскости XZ и YZ соответственно. В системе координат $X'Y'Z$, повернутой на угол α вокруг оси Z так, чтобы ось Y' была параллельна проволокам стереослоев “ α ”, трек описывается уравнениями проекции на плоскости $X'Z$ и $Y'Z$:

$$x'(z) = x'_0 + t'_x(z - z_0), \quad y'(z) = y'_0 + t'_y(z - z_0).$$

Параметры проекций трека в двух системах координат XYZ и $X'Y'Z$ связаны между собой соотношениями:

$$\begin{aligned}x'_0 &= x_0 \cos \alpha - y_0 \sin \alpha, & t'_x &= t_x \cos \alpha - t_y \sin \alpha; \\y'_0 &= x_0 \sin \alpha + y_0 \cos \alpha, & t'_y &= t_x \sin \alpha + t_y \cos \alpha.\end{aligned}\quad (8)$$

Измерения со стереослоев “0” используются для восстановления проекции прямого трека на плоскость XZ в соответствии с алгоритмом, описанным в предыдущем разделе. Для восстановления проекции трека на плоскость YZ с помощью измерений в стереослоях “ α ” можно использовать соответствующее преобразование Хафа, учитывающее сигналы с наклонных проволок.

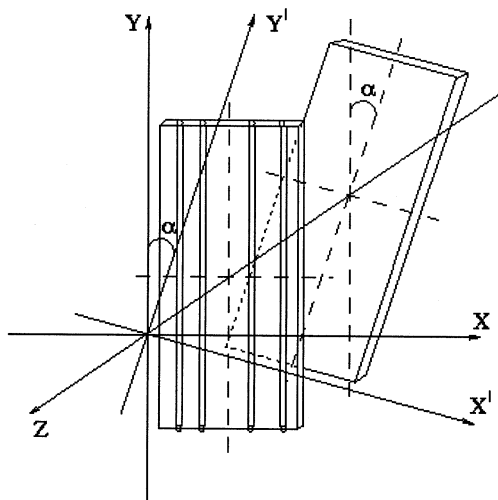


Рис. 4. Модули в повернутой $X'Y'Z$ и лабораторной XYZ системах координат

Хаф-образ единичного измерения в стереослое “ α ” для проекции трека на плоскость $X'Z$ в системе повернутых координатных осей $X'Y'Z$ (рис. 4) определяется некоторым множеством точек, принадлежащих подпространству P'_x параметров x'_0, t'_x . Границы этого множества задаются выражениями

$$x'_0(t'_x) = x'_i - (z_i - z_0)t'_x \pm R\sqrt{1 + t'^2_x} \quad (9)$$

для трубок радиуса R , работающих в пропорциональном режиме, или

$$x'_0(t'_x) = x'_i - (z_i - z_0)t'_x \pm (r_i \pm c)\sqrt{1 + t'^2_x} \quad (10)$$

— в режиме измерения расстояния дрейфа r_i . В выражениях (9), (10), x'_i и z_i — координаты сработавшей проволоки стереослоя “ α ” в системе повернутых осей

$X'YZ$; c — параметр алгоритма, связанный с пространственным разрешением дрейфовой камеры.

Подставив в формулы (9) и (10) соотношения (8), получим соответственно:

$$y_0(t_y; x_0, t_x) = \frac{x_0 + t_x(z_i - z_0)}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{x'_i}{\sin \alpha} - t_y(z_i - z_0) \pm \frac{R}{\sin \alpha} \sqrt{1 + (t_x \cos \alpha - t_y \sin \alpha)^2} \quad (11)$$

— для пропорциональных камер, или

$$y_0(t_y; x_0, t_x) = \frac{x_0 + t_x(z_i - z_0)}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{x'_i}{\sin \alpha} - t_y(z_i - z_0) \pm \frac{r_i \pm c}{\sin \alpha} \sqrt{1 + (t_x \cos \alpha - t_y \sin \alpha)^2} \quad (12)$$

— для дрейфовых камер. При фиксированных значениях параметров x_0 , t_x выражения (11), (12) определяют границы полос на плоскости P_y параметров y_0 , t_y , соответствующих хэф-образу единичного измерения с наклонной проволоки для проекции трека (7) на плоскость YZ .

Пусть параметры x_0 , t_x для проекции трека на плоскость XZ уже определены на основе измерений в стереослоях “0” с помощью преобразований Хафа, описанных в предыдущем разделе. Тогда для проекции трека на плоскость YZ соответствующие хэф-образы в пространстве P_y параметров y_0 , t_y могут быть построены с помощью измерений в стереослоях “ α ” из соотношений (11), (12). Используя алгоритм рисования полос на растре, аналогичный описанному в предыдущем разделе, можно получить оценки параметров y_0 , t_y для проекции трека на плоскость YZ .

3. ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Непрерывное подпространство P_x параметров трека x_0 , t_x разбивается на дискретный растр размерностью $n \times m$, который описывается двумерным массивом точек растра $\rho(l, k)$ с индексами $l = 1, \dots, n$ и $k = 1, \dots, m$. Таким образом, задача построения хэф-образов M_k единичных измерений сводится к заполнению элементов массива $\rho(l, k)$. Размерность растра является настроечным параметром алгоритма.

Для сортировки и упорядочения множеств M_{1n} (5) в соответствии с критерием $J(M)$ вводится специальная структура — массив списков, определяющий иерархию заполненных точек растра. Данный массив списков представляет собой вектор-столбец, каждый элемент которого является

указателем на двусвязный список и соответствует определенному значению критерия $J(M) > J_{min}$. Пороговое значение критерия достоверности J_{min} выбирается равным минимальному числу ячеек, способных сработать в результате прохождения заряженной частицы. Заполнение хафовских полос на растре сопровождается построением соответствующей иерархии массива списков по следующему алгоритму:

- Если точка растра с индексами l, k принадлежит хаф-образу единичного измерения M_k , то в этом случае значение соответствующего элемента $\rho(l, k)$ увеличивается на единицу.
- Если после этого $\rho(l, k) < J_{min}$, то точка (l, k) не заносится в иерархию.
- Если $\rho(l, k) = J_{min}$, то точка (l, k) добавляется в список для $J = J_{min}$.
- Если $\rho(l, k) > J_{min}$, то точка (l, k) выбрасывается из списка иерархии, соответствующего уровню $J = \rho(l, k) - 1$, и добавляется в список для уровня $J = \rho(l, k)$.

В результате такой процедуры точки, через которые проходит максимальное количество полос, оказываются на верхних уровнях иерархии. Использование иерархии позволяет проводить поиск максимумов только по ячейкам растра $\rho(l, k)$, удовлетворяющим критерию $J(M) \geq J_{min}$, избегая незаполненные зоны, что существенно уменьшает полное время обработки события.

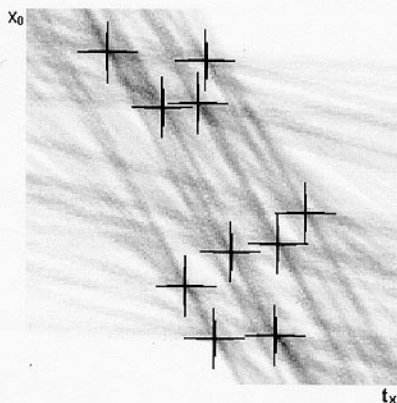


Рис. 5. Пример глобального растра в переменных x_0, t_x для события из 10 треков, разыгранных методом Монте-Карло. Меньшие по размеру крестики отмечают на растре максимумы, соответствующие параметрам x_0, t_x разыгранных треков. Большие крестики отмечают значения параметров x_0 и t_x , определенные с помощью описываемого в работе алгоритма распознавания треков

Для распознавания XZ -проекции прямолинейного трека и приближенной оценки его параметров сначала производится построение хаф-образов единичных

измерений в вертикальных стереослоях в режиме пропорциональной камеры, то есть без учета времени дрейфа, и заполняется так называемый *глобальный XZ-растр* в переменных x_0, t_x . При этом не заполняются области растра, соответствующие значениям параметров x_0, t_x для треков, которые заведомо не представляют интереса (например, для частиц, проходящих под большими углами к оси пучка или с импульсами меньше некоторого порогового значения). На рис. 5 показан пример визуализации глобального растра, построенного для одного события, разыгранного методом Монте-Карло и состоящего из 10 треков. Меньшими по размеру крестиками отмечены значения параметров x_0, t_x разыгранных треков, которые определяют положение соответствующих максимумов на растре, возникающих в результате пересечения хаф-образов единичных измерений.

С помощью массива списков, определяющего иерархию заполненных точек глобального растра, находится точка на растре с максимальным значением ячейки $\rho(l, k)$ и определяются соответствующие этой точке значения параметров x_0, t_x , которые рассматриваются как приближенное измерение параметров проекции трека-кандидата, породившего данный максимум на глобальном XZ-растре. Затем с учетом измеренных расстояний дрейфа r строится *локальный XZ-растр* в увеличенном масштабе для области, окружающей найденный максимум. Локальный XZ-растр заполняется на основе сигналов только с тех вертикальных проволок, координаты которых лежат в некоторой окрестности проекции трека-кандидата с приближенными значениями параметров x_0, t_x , найденными по глобальному растре. Ширина этой окрестности является настроечным параметром алгоритма.

На рис. 6 показан типичный вид локального растра, построенного для проекции трека-кандидата с учетом расстояний дрейфа, определенных в каждом единичном измерении. С использованием массива списков, определяющего иерархию заполненных точек локального растра находится точка на растре с максимальным значением ячейки J_{\max}^{loc} и выделяется множество точек M в некоторой окрестности этого максимума: $J_{\max}^{loc} - k \leq J(M) \leq J_{\max}^{loc}$, где k есть целое число, которое определяет размеры множества M и является настроечным параметром алгоритма. Затем с помощью взвешивающего алгоритма (6) находится центр тяжести множества M точек на локальном XZ-растре и тем самым уточняются значения параметров x_0, t_x для проекции трека-кандидата. При этом уже на этапе распознавания образа трека автоматически разрешается проблема право-левой неопределенности. Большими крестиками на глобальном растре рис. 5 отмечены значения параметров x_0 и t_x , определенные с помощью описанного выше алгоритма. Они практически полностью сливаются с меньшими по размеру крестиками, которые соответствуют точным значениям параметров x_0, t_x разыгранных треков. Таким образом, описанный метод обеспечивает высокую точность определения параметров горизонтальной проекции трека уже на стадии его распознавания.

После определения окончательных значений параметров x_0, t_x XZ-проекции трека-кандидата поиск его вертикальной YZ-проекции осуществляется на основе измерений в наклонных стереослоях "α".

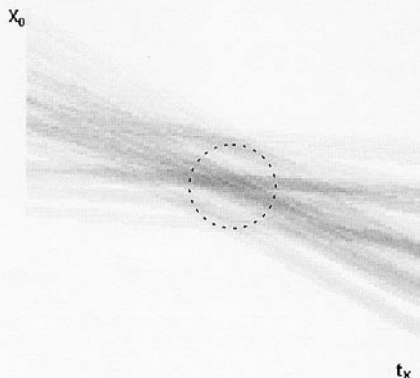


Рис. 6. Пример локального растра для XZ -проекции трека-кандидата с учетом измеренных расстояний дрейфа. Окружностью выделена область, в которой находится локальный максимум

Для соответствующих значений параметров x_0 , t_x строится YZ -растр с учетом расстояний дрейфа r , измеренных в сработавших наклонных трубках, аналогично тому, как это делалось при заполнении глобального XZ -растра. Используются сигналы только с тех проволок стереослоев “ α ”, которые пересекаются вертикальной плоскостью, проходящей через найденную XZ -проекцию. По элементам растра, лежащим на верхнем уровне YZ -иерархии определяются параметры y_0 , t_y для YZ -проекции трека-кандидата. Типичный вид YZ -растра показан на рис. 7. Данный метод позволяет с высокой надежностью установить однозначное соответствие XZ - и YZ -проекций для каждого распознанного трека.

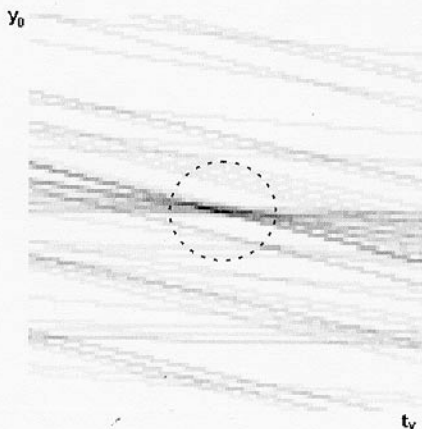


Рис. 7. Пример YZ -растра

После распознавания XZ - и YZ -проекций трека-кандидата производится вычитание хэф-полос использованных для этого сигналов из глобального XZ -растра и соответствующая перестройка созданной для него иерархии массива списков по следующему алгоритму:

- Если точка растра с индексами l, k принадлежит хэф-образу вычитаемого единичного измерения M_k , то в этом случае значение соответствующего элемента $\rho(l, k)$ уменьшается на единицу.
- Если до вычитания $\rho(l, k) > J_{min}$, то точка (l, k) удаляется из списка иерархии, соответствующего уровню $J = \rho(l, k)$, и добавляется в список для уровня $J = \rho(l, k) - 1$.
- Если до вычитания $\rho(l, k) = J_{min}$, то точка (l, k) полностью выбрасывается из иерархии.

Затем находится следующий максимум на перестроенном глобальном XZ -растре, и вся описанная выше последовательность действий выполняется для другого трека-кандидата до тех пор, пока в глобальной иерархии остаются точки растра $\rho(l, k) \geq J_{min}$. Вычитание использованных сигналов из растра с одновременной перестройкой иерархии обеспечивает помехоустойчивость алгоритма в условиях высокого уровня загрузки детектора треками частиц и при наличии шумов.

В программной системе *Htr*, созданной на языке программирования *C++* и предназначенной для работы в среде *UNIX*, описанный выше алгоритм был реализован для пространственного распознавания прямолинейных треков заряженных частиц в камерах *PC* (*Pattern Chamber*) внешнего трекового детектора [4] установки *HERA-B* [5]. Эта система была подключена к глобальной системе обработки данных *ARTE* [6] этого эксперимента и протестирована как на событиях, разыгранных с помощью метода Монте-Карло, так и на реальных данных.

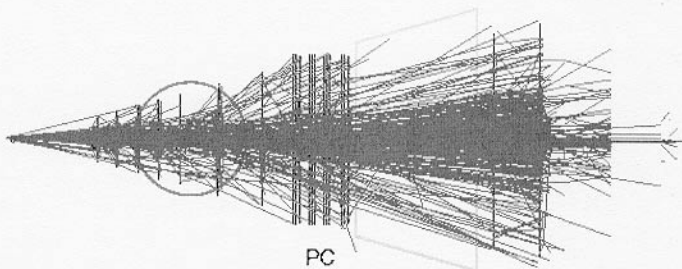


Рис. 8. Множественность типичного события на установке *HERA-B*

Камеры *PC* внешнего трекера состоят из 24 вертикальных и повернутых стереослоев, которые насчитывают более 60000 каналов регистрации. Большое число неэффективно работающих каналов (мертвые и шумящие проволочки), доля

которых доходит до 15% от общего числа каналов регистрации, значительно затрудняет реконструкцию трека на стадии его распознавания. Несмотря на это, даже при высоком уровне радиационной загрузки установки HERA-B (см. рис. 8), когда отдельное событие может включать в себя до 100 и более треков, программа *Htr* позволяет эффективно распознавать отдельные прямые треки в суперслоях РС и с хорошей точностью определять их параметры. В частности, при реальных загрузках средняя эффективность нахождения треков с помощью программы *Htr* достигает 90%. При этом доля ложно восстановленных траекторий составляет 23%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод пространственного распознавания прямолинейных треков и его программно-алгоритмическая реализация содержат следующие элементы новизны:

1. Предложена модификация преобразования Хафа для единичных измерений с учетом расстояния дрейфа. Наличие в этом случае двух хафовских полос в пространстве параметров трека позволяет разрешить проблему право-левой неопределенности уже на этапе распознавания его образа.

2. Реализован алгоритм поиска максимумов на растре, отображающем пространство параметров трека, с помощью массива списков, который определяет иерархию заполненных точек растра. Это позволяет значительно ускорить обработку событий до уровня, сравнимого с быстродействием других алгоритмов.

3. Для увеличения помехоустойчивости алгоритма в условиях высокого уровня трековой загрузки детектора при наличии шумов и мертвых каналов разработана процедура вычитания использованных сигналов из растра с одновременной перестройкой иерархии массива списков.

4. Учет измерений с наклонных стереослоев дрейфовых камер с помощью соответствующей модификации преобразования Хафа обеспечивает однозначную увязку горизонтальной и вертикальной проекций распознанного трека.

Развитая в пакете *Htr* программная реализация метода обеспечивает стабильную работу алгоритма реконструкции в широком диапазоне загрузок детектора при скорости обработки событий, удовлетворяющей требованиям конкретного эксперимента.

Автор выражает благодарность Д.Д. Емельянову, А.В. Ланеву, Г.А. Ососкову и А.А. Спиридонову за помощь и поддержку в ходе исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Ber. Ver. Sächs. Akad. Wiss.: Leipzig, Math-Phys. Kl., 69:262-277, 1917.
2. Toft P. The Radon Transform. Theory and Implementation // Ph.D. Thesis: Department of Mathematical Modelling, Section for Digital Signal Processing, Technical University of Denmark, 1996. <http://www.ei.dtu.dk/staff/ptoft/ptoft.html>
3. Hough P. V. C. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns: US Patent 3,069,654, 1962.
4. Lanyov A. Modular OTR Geometry Description in ARTE: HERA-B Note 97-259, Zeuthen, 1997.
5. Hartouni E., et al. HERA-B: An Experiment to Study CP-violation in the B System Using the Internal Target at the HERA-B Proton Ring. Design Report: DESY-PRC 95/01, 1995.
6. Albrecht H. ARTE (Analysis and Reconstruction Tool): HERA-B Note 95-065, Hamburg, 1995. <http://www-hera-b.desy.de/subgroup/software/arte>

Рукопись поступила в издательский отдел
29 августа 2001 года.

Бельков А.А.

P10-2001-182

Использование преобразования Хафа для пространственного распознавания прямолинейных треков в дрейфовых детекторах

Рассмотрен метод пространственного распознавания прямолинейных траекторий заряженных частиц в трековых системах, состоящих из стереослоев дрейфовых камер, в основе которого лежит модификация преобразования Хафа с учетом измерений расстояния дрейфа. Предложенная в работе программно-алгоритмическая реализация метода позволяет оптимизировать по времени обработку событий, обеспечить стабильность работы алгоритма и высокую эффективность распознавания треков в условиях высокого уровня трековой загрузки детектора, а также большого числа шумящих и неработающих каналов.

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Belkov Ar.A.

P10-2001-182

Implementation of the Hough Transform for 3D Recognition of the Straight Tracks in Drift Chambers

This work is devoted to the development of the method for 3D reconstruction of the charged-particle straight tracks in the tracking systems consisting of the drift-chamber stereo layers. The method is based on the modified Hough transform with taking into account the measurements of drift distance. The proposed program realization of the method provides the time-consuming optimization of event processing, the stable performance of algorithm and high efficiency of the track recognition under large track-occupancy of detector as well as under high level of noisy and dead channels.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 10.09.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,28

Тираж 300. Заказ 52853. Цена 1 р. 28 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области