

УДК 539.1.073.3

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

Р. А. Позе

Институт физики высоких
энергий АН, ГДР

В работе рассматриваются основные методы измерения и первичной обработки снимков с пузырьковых камер. Особое внимание уделяется методам фильтрации информации в различных системах обработки. Показывается, что применяемые в разных устройствах методы фильтрации можно свести к небольшому числу приемов, и что эти системы в основном различаются распределением функций в процессе фильтрации между человеком, прибором и ЭВМ.

Some basic methods of data processing for bubble chamber pictures are considered. The main attention is paid to the filtering of information in various data handling systems. It is shown, that the used methods for filtering data can be reduced to a small number of ideas and that these systems mainly differ in the distribution of functions between man, device and computer.

ВВЕДЕНИЕ

Важной особенностью методики пузырьковых камер является регистрация результатов взаимодействия элементарных частиц на трех или более стереофотографиях. Таким образом, хотя сам физический эксперимент и его обработка независимы, всегда имеется возможность повторного обращения к первичной информации об эксперименте.

Процесс извлечения нужной для физика информации из этих стереофотографий разделяется на несколько этапов. Рассмотрим кратко основные этапы процесса обработки снимков с пузырьковых камер. Событие полностью определено, если известны масса и импульс каждой частицы, участвующей во взаимодействии. Импульс заряженной частицы полностью определяется положением ее траектории в пространстве, т. е. радиусом кривизны и двумя углами в точке взаимодействия. Чтобы определить траекторию заряженных частиц в пространстве камеры — геометрической реконструкции, необходимо измерять по меньшей мере на двух

стереопроекциях декартовы координаты нескольких (5—25) точек, распределенных равномерно по всему следу. Точность измерения координат — несколько микрон. При помощи этих данных программа геометрической реконструкции (например, THRESH [1]) может полностью восстановить след частицы, определить два угла и радиус кривизны, а также экспериментальные погрешности этих величин.

При дальнейшей обработке — на этапе кинематической идентификации — параметры всех следов каждого события варьируются с учетом их погрешностей так, чтобы выполнялись законы сохранения импульса и энергии до и после столкновения частиц (например, GRIND [1]). На этом этапе обработки существенное значение приобретают массы участвующих во взаимодействии частиц. Обычно приходится рассматривать несколько различных гипотез о природе участвующих в реакции как зарегистрированных частиц, так и нейтральных, не видимых в камере частиц.

Результат этих вычислений — выделение одной или нескольких наиболее вероятных гипотез о данном событии. Для таких гипотез определяются дополнительные физические величины, используемые физиками при дальнейшем анализе.

Программы геометрической реконструкции и кинематической идентификации, а также программы статистической обработки результатов эксперимента представляют собой большие системы программ, которые разрабатываются в основном в больших физических лабораториях. Наибольшее распространение в европейских лабораториях получила цепочка программ, разработанная в ЦЕРНе — THRESH, GRIND, SLICE, SUMX [1]. Однако обработка снимков до этапа геометрической реконструкции связана с техническими разработками, что и привело к большому разнообразию методов, приборов и систем обработки.

На каждом снимке с любой пузырьковой камеры имеется: 1) информация о номере кадра и пленки и о проводимом эксперименте в закодированной форме; 2) набор реперных крестов, которые служат для привязки результатов измерений на снимке к координатной системе пузырьковой камеры; 3) множество пузырьков.

Первая задача обработки снимков состоит в том, чтобы из этого множества пузырьков выделить те, которые образуют следы, принадлежащие к искомым событиям. Это типичная проблема распознавания образов.

Обычно процедура распознавания образов в плоскости начинается с разбиения данной картины на прямоугольную сетку и описания содержимого каждого элемента сетки. Исходя из размеров среднего снимка (100×50 мм² и необходимой точности измерения координат пузырьков (2—3 мкм), число таких элемен-

тов будет порядка 10^9 . Анализ такого числа элементов не под силу даже современным вычислительным машинам. Так как большая часть снимка, как правило, не содержит информации, то автоматические сканирующие устройства (HPD, POLLY и др.) выдают информацию (координаты, формы сигналов) только об обнаруженных объектах, т. е. о пузырьках, реперных крестах и т. д. В этом случае информация, снимаемая со снимка, существенно уменьшается. В среднем при помощи упомянутых сканирующих устройств с одной стереопроекции снимается около 100 000 пар координат. Однако программе геометрической реконструкции требуется только 50—100 пар координат для одного события. Таким образом, следующий этап обработки должен состоять в существенном сокращении информации. Эту процедуру обычно называют фильтрацией данных. В зависимости от конкретного прибора в нее входят: распознавание элементов следов, прослеживание следов, отбор нужных следов, отбрасывание ненужных элементов и пузырьков.

1. ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ПУЗЫРЬКОВ НА СНИМКЕ

При использовании ручных измерительных устройств оператор сам выбирает те пузырьки, координаты которых необходимо измерить. Эти координаты поступают в программу геометрической реконструкции без предварительной обработки. В автоматизированных приборах используются специальные узлы, прощупывающие или сканирующие снимок. В таких узлах применяются щели с расположенными за ними светочувствительными элементами (например, ФЭУ) или тонкий мощный световой луч, который проецируется на снимок, а через него — на фотодатчик. При перемещении щели или светового луча относительно снимка на выходе фотодатчика получаются сигналы, модуляция которых точно отражает изменение степени почернения снимка. Для выделения сигналов от пузырьков и реперных крестов из общего фона используются различные методы фильтрации сигналов, которые основываются на том обстоятельстве, что форма искоемых сигналов хорошо известна. С помощью специальных электронных схем находится середина сигналов от пузырька, и координаты середины пузырька считаются координатами данного пузырька. Таким путем достигается точность измерения координат пузырьков в 3—5 *мкм*. Хороший обзор по методам нахождения координат пузырьков дан в работе [2].

Точность и надежность нахождения сигналов от пузырьков существенно зависит от таких параметров, как отношение сигнала к шуму и изменение фона по снимку и по пленке, которые, в свою очередь, зависят от качества снимков и от оптико-механической и электронной аппаратуры прибора.

На рис. 1 показаны средние значения коэффициента пропускания для снимков с двухметровой жидководородной пузырьковой камеры ЦЕРНа (II), в которой режим эксплуатации хорошо отработан, и для самых первых снимков с жидководородной пузырьковой камеры «Мирабель». Измерения проводились на микрофотометре фирмы «Народное предприятие Карл Цейсс Иена».

В светосильных приборах с бегущим лучом отношение сигнала к шуму обычно достаточно велико, так что можно ограничиться

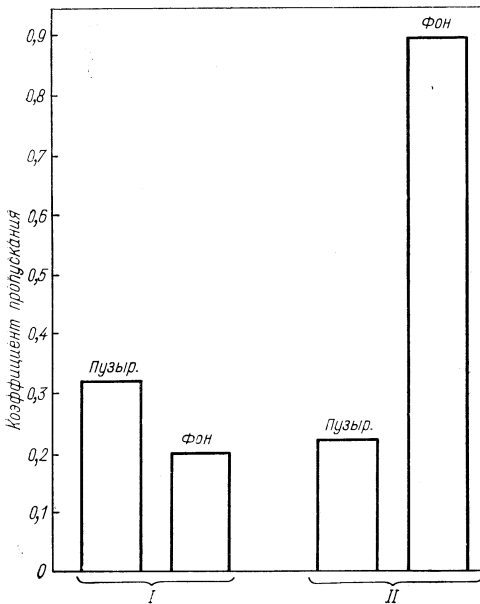


Рис. 1. Измеренные на микрофотометре средние значения коэффициента пропускания:

I — для снимков водородной пузырьковой камеры «Мирабель» (темный фон, светлые следы); II — для снимков с 2-метровой водородной камеры ЦЕРНа (светлый фон, темные следы).

регулировкой уровня дискриминации сигналов. Эта регулировка привязывается или к числу найденных точек на одной линии сканирования, или к числу сигналов от первичных следов. Однако в условиях, когда контрастность следов не очень высока, фон на различных участках снимка сильно различается и освещенность не достаточно высока, приходится прибегать к регулированию усиления сигналов в зависимости от окружающего фона. Это особенно важно в тех случаях, когда наряду с измерением координат пузырьков измеряется их плотность. Регулирование усиления сигналов производится автоматически. Принципы такого регулирования хорошо описаны в работах [3, 4].

2. ФИЛЬТРАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ СНИМКА

Конструкции отдельных приборов для обмера снимков с пузырьковых камер довольно сильно отличаются друг от друга. Однако в процессе фильтрации информации, как правило, используются одни и те же методы, отличающиеся лишь последовательностью их применения и распределением функций между оператором, прибором и ЭВМ. Рассмотрим более подробно методы, применяемые для фильтрации информации.

Распознавание элементов следов

Пузырек, принадлежащий к какому-либо следу, ничем не отличается от любого другого пузырька. Чтобы выделить пузырьки, принадлежащие одному следу, необходимо использовать информацию о взаимном расположении или распределении группы пузырьков на следе. Эти соображения и легли в основу двух методов нахождения элементов следов — метода гистограммирования и метода выделения цепочек пузырьков (STRINGING).

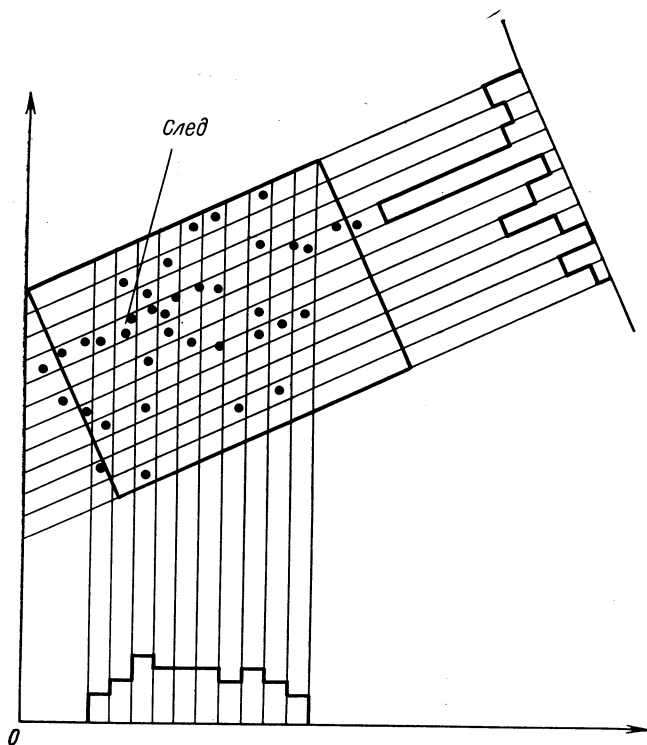


Рис. 2. Принцип гистограммирования под разными углами наклона. В гистограмме по направлению следа выделяется явный максимум.

Метод гистограммирования. Короткий отрезок следа заряженной частицы с хорошей точностью аппроксимируется прямой. Поэтому поиск элементов следов проводится в ограниченных областях снимка, соответствующих длине 1—2 см в пространстве камеры. Эта область разбивается на полосы шириной 10—40 мкм, и по числу точек, содержащихся в таких полосах, строится гистограмма, как показано на рис. 2. Если такое разбиение и гисто-

граммирование провести под разными углами наклона, то элемент следа (если такой имеется в области поиска) вызывает резкий максимум в той гистограмме, наклон которой наиболее близко совпадает с направлением этого элемента. Разумеется, что разбиение области поиска можно осуществить дугой окружности постоянного радиуса, а затем строить гистограмму. Этот путь может оказаться эффективным при поиске элементов сильно искривленных следов. Найденный таким образом элемент следа характеризуется координатами центра инерции (x , Y) (MASTER POINT) и углом наклона.

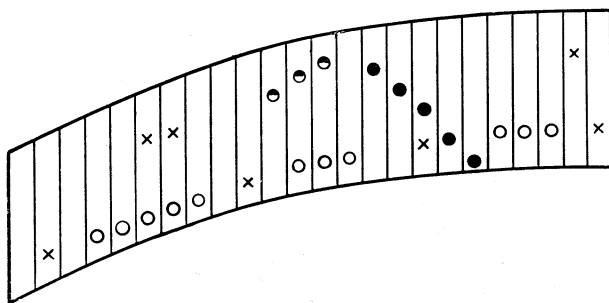


Рис. 3. Принцип выделения цепочек пузырьков:
●, ○ — составляют цепочки; ×× — нет.

Метод выделения цепочек пузырьков. Пузырьки распределены по следу статистически, средняя плотность в определенных пределах зависит от импульса частицы. Шаг сканирования снимка обычно выбирается такой, чтобы вероятность нахождения пузырьков на следе была достаточно большой. Вследствие этого довольно часто один и тот же след вызывает сигналы на следующих одна за другой линиях сканирования. Они и используются в методе выделения цепочек пузырьков.

Из точек на следующих одна за другой линиях сканирования, лежащих приблизительно на одной прямой, формируются цепочки (рис. 3), которые могут содержать 3—8 точек. Отметим, что для следов первичных частиц с большим радиусом кривизны и минимальной плотностью допускаются даже разрывы до трех линий между точками цепочки. Цепочка, как и элемент следа, характеризуется углом наклона и координатами центра инерции. Отдельные цепочки можно объединить в элемент следа, если все они лежат приблизительно на одной прямой. В такой элемент также можно включить отдельные точки, лежащие в пределах этого элемента (рис. 4).

Описанные методы распознавания элементов следов не всегда четко разделяются. Например, использование в аппаратурной

части прибора продольной щели для сканирования снимков по-существу является одновременным применением методов гистограммирования и выделения цепочки пузырьков. С другой стороны, оба метода дополняют друг друга. Метод гистограммирования хорошо работает в случае серых и даже слабых следов, форма

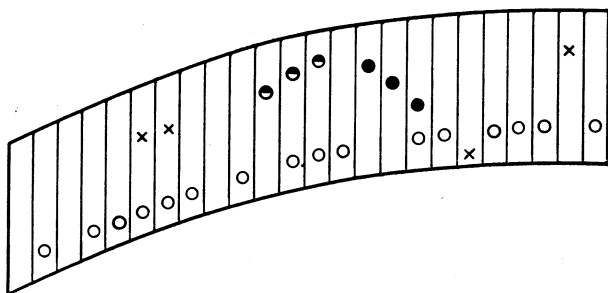


Рис. 4. Объединение отдельных цепочек в элемент следа $OO \dots O$. В этот элемент включаются отдельные точки \times, \bullet .

которых близка к основанию гистограммы. Для черных следов с большой плотностью и маломеняющимся радиусом кривизны эффективен метод выделения цепочек пузырьков. На практике часто приходится применять и тот и другой метод.

Нахождение следов

Следы состояются из элементов, принадлежащих ему. В большинстве систем обработки используется метод прослеживания следов. Прослеживание начинается с одного конца следа. На основании имеющейся информации о следе и параметров первого элемента предсказывается область поиска следующего элемента. После нахождения этого элемента уточняются сведения об искомом следе и предсказывается, уже более определенно, область поиска следующего элемента и т. д.

При интегральном методе весь след или его часть находят сразу, используя ранее найденные элементы и точки. Этот метод менее распространен, поскольку восстановление следов производится только после сканирования всего снимка (off-line).

3. СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ С ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР

С момента запуска первых пузырьковых камер в различных лабораториях мира было создано много разнообразных систем для просмотра и измерения снимков. В периодической печати

имеется целый ряд обзоров и отчетов с конференций о конструктивных особенностях, о принципах работы аппаратурной и программной частей этих систем (см., например, [5, 6]). Рассмотрим с точки зрения применения описанных выше методов фильтрации информации наиболее распространенные и успешно работающие системы.

Приборы для ручной обработки снимков

Просмотр пленок. Первый этап обработки заключается в просмотре пленок и в отборе снимков с требуемыми для данного эксперимента событиями. В системах с ручным просмотром для этого используются проекторы, которые в масштабе 1 : 5—1 : 15 проецируют снимки на горизонтальный экран. Для удобства работы такие проекторы оснащаются механизмами перемотки пленок, узлами отсчета номера кадра и т. д. Наиболее совершенные проекторы имеют также и систему отсчета координат (50—200 *мм* по пленке). Последние, как правило, работают на линии с вычислительной машиной, которая принимает и проверяет данные, поступающие с проектора. Количество информации, получаемой при просмотре, в основном зависит от метода дальнейшей обработки.

На рис. 5 показан в качестве примера один из просмотрных проекторов Института физики высоких энергий АН (ГДР) [7] с телетайпом, при помощи которого данные просмотра непосредственно передаются в вычислительную машину типа ТРА. В ЭВМ эти данные формируются в определенные массивы и выдаются на бумажную ленту. При вторичном просмотре той же пленки лента с результатами первого просмотра вводится в ЭВМ, которая сравнивает их с поступающими со вторичного просмотра данными. Если результаты просмотров совпадают, то на бумажную ленту выдается окончательная информация о данном событии. Если же результаты двух независимых просмотров не совпадают, то ЭВМ дает соответствующие указания оператору вторичного просмотра, а тот принимает окончательное решение о данном событии, которое также выдается на бумажную ленту.

При ручном просмотре оператор выполняет три функции:

- 1) из большого числа снимков выбирает те, на которых имеются события желаемого класса;
- 2) описывает топологию и особенности найденного события;
- 3) для облегчения дальнейшего процесса обработки в некоторых системах оператор измеряет координаты нескольких особых точек события.

Ручное измерение. Первыми и самыми простыми измерительными приборами были установки с ручным измерением координат пузырьков и реперных крестов. Принципиальная схема такого прибора показана на рис. 6. Обрабатываемый снимок или его

часть проецируется на экран в масштабе $1 : 10 - 1 : 30$, на котором изображена измерительная метка. Измерение осуществляется совмещением этой метки с измеряемой точкой. Для этого в зависимости от конкретной конструкции прибора оператор перемещает или пленку относительно объектива и экрана, или объектив отно-

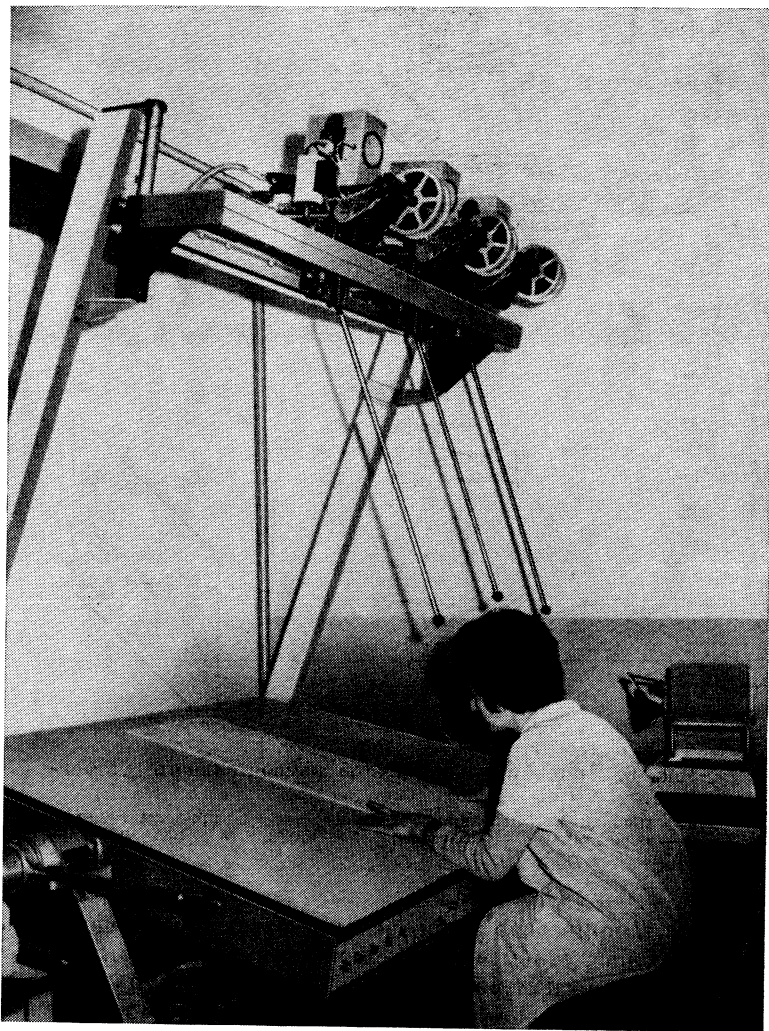


Рис. 5. Просмотровый проектор, разработанный в ИФВЭ АН (ГДР).

сительно пленки и экрана, или метку относительно объектива и пленки. Перемещение указанных узлов измеряется специальными датчиками с точностью 2—2,5 мкм. Точность измерения пузырьков обычно характеризуется средним квадратичным расстоянием точек от восстановленного следа (RESIDUAL).

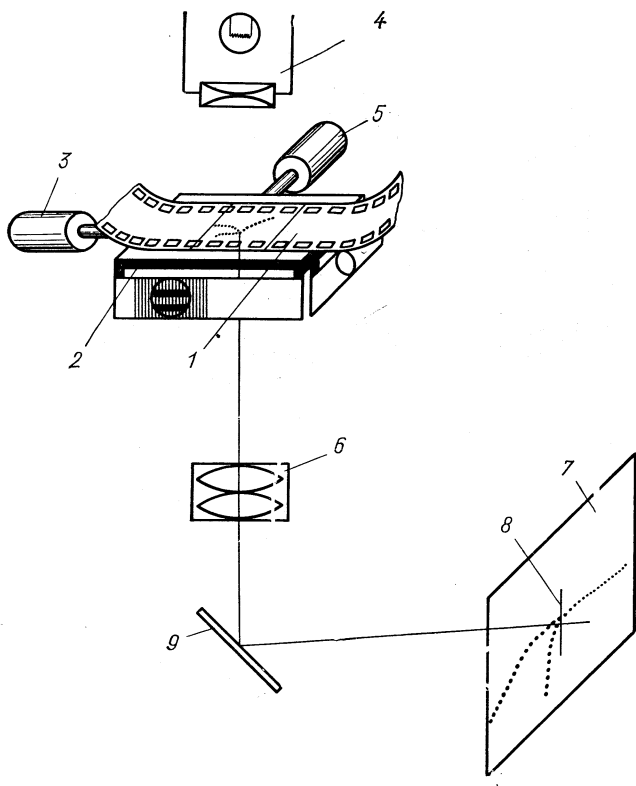


Рис. 6. Принципиальная схема измерительного устройства.

1 — пленка; 2 — передвижной столик; 3, 5 — приводы столика; 4 — осветитель; 6 — объектив; 7 — экран; 8 — измерительная метка; 9 — зеркало.

На рис. 7 приведено распределение расстояний точек от следов, измеренных на ручном измерительном микроскопе типа UMM [8].

При ручном измерении оператор, используя информацию просмотра, находит снимок с измеряемым событием и на основании указанной топологии события находит только такие точки на следах, которые войдут в программу геометрической реконструкции. В этих системах для распознавания следов и событий используется

человек с его хорошо развитым аппаратом опознавания. Средняя производительность измерения на таких приборах достигает приблизительно 3 событий/ч. Она, конечно, зависит от сложности событий и от качества снимков.

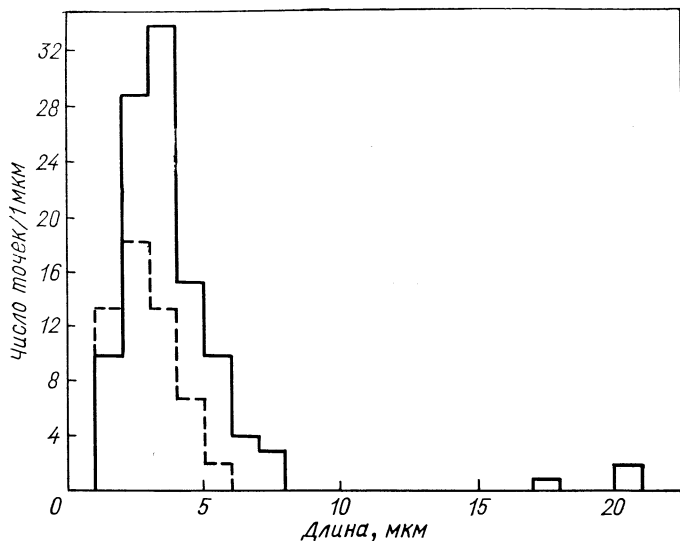
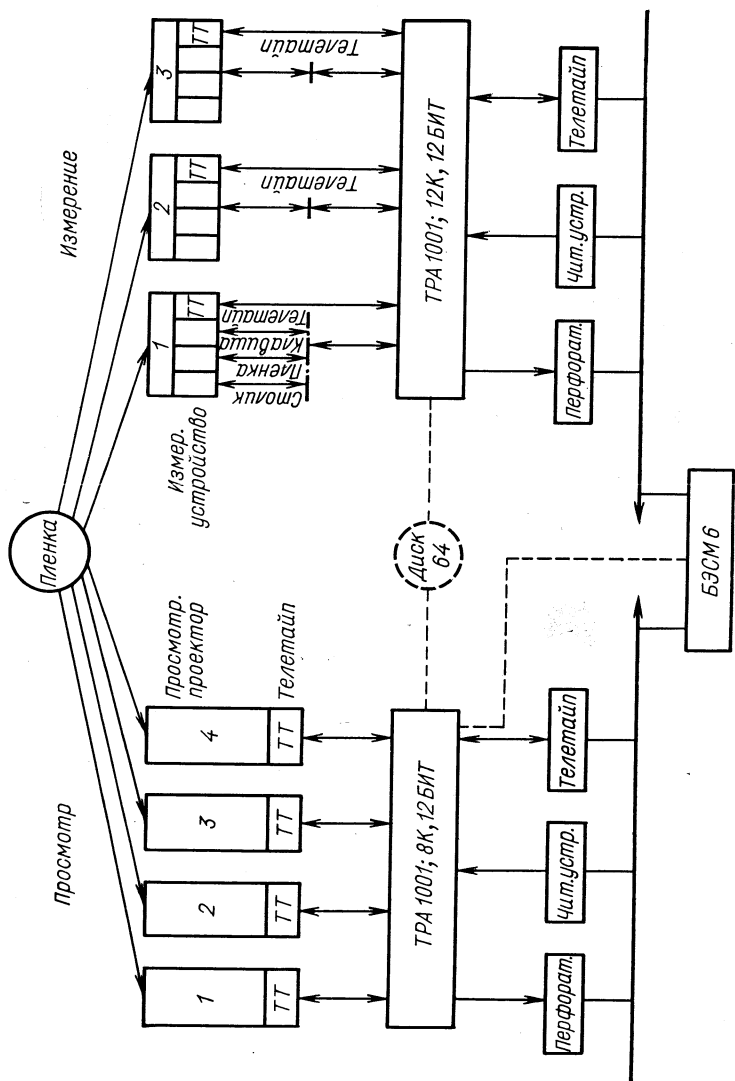


Рис. 7. Распределение средних отклонений измеренных точек от найденного следа для измерительного микроскопа типа UMM:

— — 107 следов вторичных частиц; - - - - 53 следа первичных частиц для эксперимента К-р при 10 Гэв/с.

Следящие системы. С исторической точки зрения дальнейшим развитием ручных измерительных приборов являются следящие системы. Оператор выводит следящую головку на изображение траектории, а дальше прибор автоматически следит за изображением траекторий и выдает (периодически или по команде оператора) координаты точек, которые поступят в программу геометрической реконструкции. Функции оператора в этих приборах по сравнению с ручным измерением уменьшились. Он только один раз указывает на каждый измеряемый след, а вся дальнейшая фильтрация информации выполняется аппаратной частью прибора. Такие системы во многих случаях не оправдали себя. С одной стороны, они представляли собой довольно громоздкие электронные системы с большой вероятностью отказов, а с другой — были недостаточно устойчивы относительно помех на снимках и слишком легко и часто срывались со следа [9]. В качестве примера прибора с использованием слежения можно назвать FRANCKENSTEIN [10].



----- Будущее

Рис. 8. Принципиальная схема системы обработки снимков, состоящая из просмотровых проекторов (SP) и измерительных приборов (ZMP), связанных с вычислительными машинами ТРА. Система эксплуатируется в ИФВЭ ГАН.

Связь приборов ручного измерения с вычислительными машинами. Новый существенный толчок для дальнейшего развития приборов с ручным измерением дало применение малых вычислительных машин, работающих на линии (on-line) с этими приборами. С точки зрения распознавания и фильтрации информации, ситуация в основном осталась прежней — использование оператора. Однако вычислительная машина освобождает его от многих подготовительных и контрольных операций. Основным результатом работы ручных приборов на линии с ЭВМ — увеличение средней производительности всей системы обработки. Такие системы и в настоящее время эксплуатируются в ОИЯИ [11], в ИФВЭ АН (ГДР) [12], Церне [13], Беркли [14] и других лабораториях. Для иллюстрации остановимся кратко на системе ZMP в ИФВЭ АН (ГДР).

На рис. 8 изображена структурная схема системы, которая состоит из трех просмотровых проекторов, связанных с ЭВМ типа ТРА через телетайпы, и трех измерительных проекторов ZMP, работающих на линии со второй ЭВМ ТРА. Процесс просмотра был описан выше. По результатам просмотра на ЭВМ БЭСМ-6 для каждой пленки готовится бумажная лента, служащая для управления процессом измерения на ЭВМ ТРА. ЭВМ вызывает следующий измеряемый снимок и нужную проекцию, передвигает столик с пленкой так, чтобы реперные кресты и вершина события последовательно подводились к измерительной метке. Чтобы измерить эти точки, оператору необходимо только подправить положение столика с помощью ручки управления. Затем оператор измеряет вершину события и на каждом следе, выходящем из этой вершины, по одной точке. Дальше ТРА экстраполирует (линейной), используя первые две точки, а затем квадратичной (по окружности), используя всегда три последние точки, подводит столик в окрестность следующей измеряемой точки, а оператор, по мере необходимости, подправляет это положение. После обмера всего следа ТРА делает некоторые проверки правильности и точности измерения и возвращает столик в вершину события.

Таким образом, задачи оператора заключаются только в точном выборе измеряемой точки. Точность измерения еще зависит от оператора, хотя вычислительная машина освободила его от вспомогательных работ и даже от слежения по следу.

В системе SOBWEB [13], схема которой показана на рис. 9, в качестве измерительных приборов используются старые следящие приборы FRANCKENSTEIN [10]. Оператор также выводит следящую головку на измеряемый след (опознавание следа), но уже вычислительная машина следит за следом, а головка сама центрируется на следе. Здесь оператор освобожден от выбора измеряемых точек, выполняемого аппаратурной частью измерительного прибора, и точность измерения уже не зависит от него.

Средняя производительность таких систем, работающих на линии с ЭВМ, может дойти до 20 событий/ч.

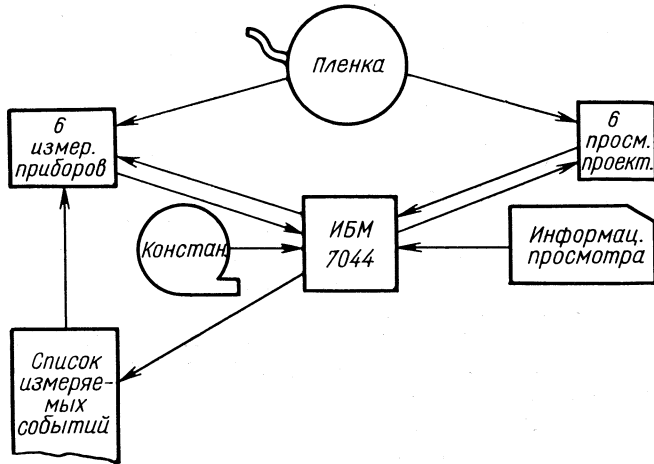


Рис. 9. Принципиальная схема системы SOBWEB, используемой в Беркли.

СКАНИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Основная цель создания сканирующих устройств (FLYING SPOT DEVICE-FSD) — исключение человека из процесса обработки, быстрый съем информации со снимка и передача ее в вычи-

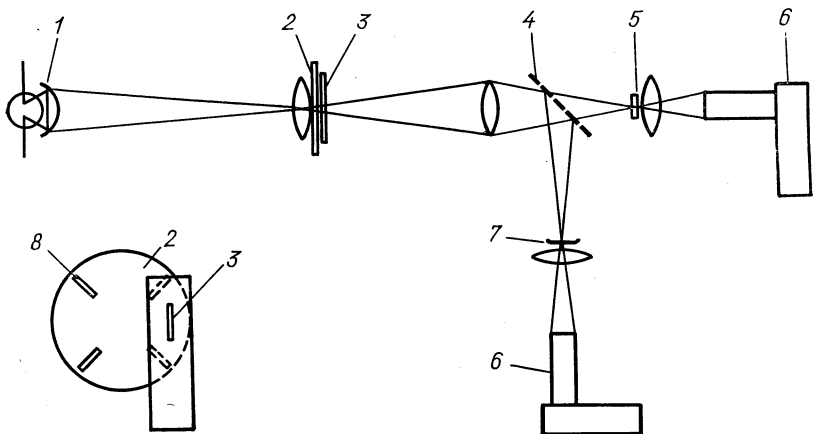


Рис. 10. Принципиальная схема сканирующего устройства NPD:
 1 — осветитель; 2 — вращающийся диск; 3 — неподвижная щель шириной 20 мкм; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — решетка; 6 — фотоумножитель; 7 — пленка на измерительном столике; 8 — щели шириной 20 мкм на диске.

слительную машину для дальнейшей обработки. Вся проблема обработки информации снимка — распознавание треков и событий, фильтрация, геометрическая реконструкция и т. д. — сводится в этом случае только к проблеме программирования.

В настоящем классе время сканирующие устройства можно разделить на два класса: оптико-механические сканирующие устройства (HPD) и электронно-оптические сканирующие устройства (CRT).

Оптико-механические сканирующие устройства. В оптико-механических сканирующих устройствах HPD (Hough-Powell Device) [15] сканирующее световое пятно образуется вращением одной щели относительно второй, как показано на рис. 10. Снимок при этом передвигается в направлении, перпендикулярном направлению сканирования. Перемещения светового пятна и снимка измеряются с высокой точностью $\pm(1,5-2)$ мкм. При пересечении пузырька световым пятном на выходе фотоумножителя образуется сигнал пузырька. Координаты этого пузырька определяются одним из методов совпадения середины сигнала пузырька с мгновенным содержанием счетчиков координат перемещения светового пятна и снимка (рис. 11).

Хотя сканирующие устройства в большинстве лабораторий имеют свои конструктивные особенности, принцип работы — снятие всей информации с одного кадра в один заход и передача ее в ЭВМ — у всех одинаковый. Отличие этих систем состоит в разных способах дальнейшей обработки информации. Наиболее простой и распространенный способ работы известен под названием ROAD GUIDANCE (система с управлением по дороге) или, что то же, под названием FULL GUIDANCE (полное управление). Другой, более сложный, способ известен под названием MINIMUM GUIDANCE (система с минимальным управлением). Способы полностью автоматической обработки обычно называют ZERO GUIDANCE (система с нулевым управлением).

Система с полным управлением. При обработке информации по методу FULL GUIDANCE сканированию снимков предшествует просмотр на просмотрово-измерительном столе. При просмотре отбираются снимки с нужными событиями, измеряются два реперных креста, все вершины данного события и две точки на каждом измеряемом следе события.

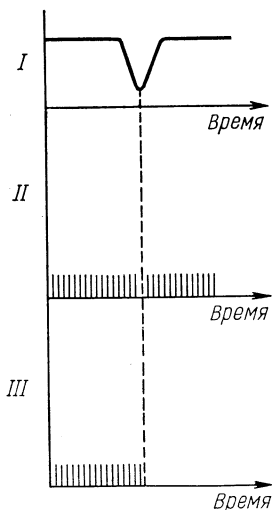


Рис. 11. Определение координат пузырька: I — сигнал пузырька; II — счетчик координат (x или y), III — значение координаты (x или y) середины пузырька.

Рассмотрим коротко на примере программы фильтрации, применяемой в ЦЕРНе, как на основании этой информации находятся треки и события [16].

Используя измеренные на каждом следе две точки и вершину события, программа проводит окружности, проходящие через такие тройки точек. Искомые следы расположены в окрестности этих окружностей. Вокруг каждой такой окружности формируется полоска шириной 400 *мкм* в обе стороны от окружности. При сканировании снимка отбрасываются все точки, лежащие за пределами этих полосок. Таким образом, удается существенно сократить первичную информацию, снимаемую со снимка. Следующий шаг — это нахождение следов внутри полосок. Для этого в начале полоски, в ее центральной части шириной около 400 *мкм*, проводится гистограммирование параллельно краю полоски.

Для каждого элемента следа, найденного таким образом, определяется в направлении наклона этого элемента более узкая полоска, по которой программа в дальнейшем следит за таким треком (в пределах первой полоски). Эта программа выполняет следующие операции:

1) разделяет точки в полосках на куски, длина которых составляет 32 линии сканирования (1,8 *мм* на снимке). Каждый след, таким образом, имеет свою полоску и свою систему кусков;

2) находит направление или наклон кусков достаточно сложной экстраполяцией, используя уже найденные средние значения точек;

3) определяет дальнейшие элементы следа и средние точки гистограммированием параллельно стороне куска;

4) после фильтрации следа с помощью метода наименьших квадратов проверяет гладкость найденного следа (состоящего из средних точек). Средние точки, расстояния которых от найденного следа превосходят определенный предел, отбрасываются.

В действительности реально используемая программа более сложная, так как в ней предусмотрена возможность обработки коротких следов, сильно искривленных следов, случаев пересечения следов под малым углом и т. д.

Метод фильтрации, используемый в Брукхейвене [17], несколько отличается от описанного выше. При поиске первого элемента следа применяется гистограммирование под разными углами наклона, что приводит к более точному определению первого элемента. При этом затраты времени на ЭВМ увеличиваются. Для прослеживания следа просто соединяются элементы, найденные в следующих один за другим кусках. В лучшем случае таким методом находится весь след, в более реальном случае определяют ряд укрупненных элементов (состоящих каждый из нескольких подэлементов), часть из которых принадлежит к данному следу, а часть нет. Для отбора правильных элементов применяется

несколько способов, вплоть до геометрической реконструкции с использованием информации с трех проекций.

Интегральный метод фильтрации. В описанных методах фильтрации след находится последовательно, шаг за шагом, хотя известно, что идеальный след близок к окружности в центре полоски. В интегральных методах используется это обстоятельство и находится весь след сразу. Такие методы описаны в работе [18]. Остановимся более подробно на методе, используемом в Колледж де Франс [19].

Процесс нахождения следа состоит из нескольких этапов: суживание полоски, реконструкция следа или его элементов, ее проверка. В начале этого процесса вся полоска рассматривается как один сегмент. Через ограниченное число точек внутри сегмента (например, через точки на каждой четвертой линии сканирования) методом наименьших квадратов проводится парабола. Если эта парабола удовлетворяет определенным критериям относительно разрывов между точками и отклонений точек от параболы, то след считается найденным. В противном случае дорожка разбивается на два сегмента, а если необходимо, то на четыре, восемь и т. д. сегментов. Ширина дорожки (полоски), в которой ищется след, определяется вначале гистограммированием параллельно стороне полоски. В каждом сегменте след снова аппроксимируется параболой. Если такой элемент следа удовлетворяет критериям, то методом экстраполяции определяется ширина дорожки в следующем сегменте. Если элемент следа не удовлетворяет критериям, то этот сегмент снова разбивается на подсегменты.

В результате этой процедуры получается список элементов следа. Точки, необходимые для программы геометрической реконструкции, находятся определением точек пересечений этих элементов с семейством прямых, перпендикулярных следу.

Несмотря на отдельные успехи, эти методы не получили широкого распространения, так как реальный след все-таки по ряду причин (грубое предварительное измерение, потери энергии частиц, изменение масштаба увеличения в зависимости от глубины следа в камере, многократное рассеяние) отклоняется от окружности, используемой в качестве аппроксимирующей кривой.

Система с минимальным управлением. В режиме MINIMUM GUIDANCE при предварительном просмотре отбираются снимки с событиями нужного типа, определяется топология события, грубо измеряются события и 1—2 реперных креста. Если в режиме FULL GUIDANCE уже на самой ранней стадии программой отбрасывается большая часть лишней информации, лежащей за пределами дорожек, то в режиме с минимальным управлением фильтруется вся информация снимка.

Процесс фильтрации начинается с поиска следов. Для этого из точек (x_i, y_i) в окрестности вершины данного события строится

гистограмма величины $(Y_i, Y_v)/(X_i - X_v)$, где (X_v, Y_v) — координаты вершины события. Точки, которые лежат на следе, выходящем из данной вершины, дают максимум на этой гистограмме. После нахождения кандидатов следов начинается процедура прослеживания следов. Так же как и в режиме полного управления, прослеживание производится разбиением всей совокупности точек на куски величиной примерно $(2 \times 0,2)$ мм² на снимке. Направление и кривизна стороны этого куска задаются как параметры найденной до этого части следа. Таким образом, точки,

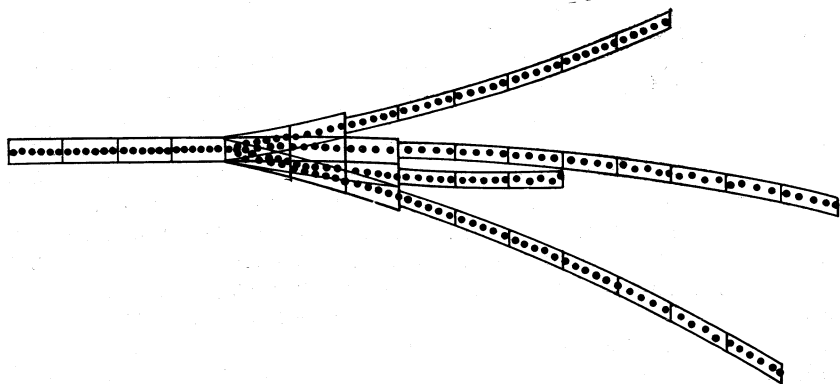


Рис. 12. Прослеживание следов методом экстраполяции.

принадлежащие искомому следу, должны быть сосредоточены возле прямой линии относительно базы данного куска (рис. 12).

При поиске элемента следа внутри куска используется сочетание методов выделения цепочек пузырьков и гистограммирования. Для каждого найденного элемента следа определяется центр инерции и наклон. Координаты центра инерции затем передаются на вход программы геометрической реконструкции.

В режиме с минимальным управлением возникает дополнительная проблема определения проекций на различных стереоснимках, соответствующих одному и тому же следу в камере. Следы, найденные в результате фильтрации информации с каждой стереопроекции, могут быть истинными проекциями следов данного события или случайными наложениями на данной проекции. Кроме этого возможно, что не на всех трех проекциях найдены проекции всех следов данного события. Таким образом, необходимо однозначно выделить проекции следов данного события на двух или более стереопроекциях. Эта процедура известна под названием TRACK MATCH. Сначала рассматриваются в ней стереопары проекций следов, а затем триплеты, и определяется, какие проекции следов не могут принадлежать одному и тому же следу. Параметрами

такого рассмотрения служат направление проекции следа вблизи вершины события, знак и величина кривизны следа, конечная точка следа в пространстве и др. В результате остается некоторый набор проекций следов, которые могут быть проекциями истинных следов данного события. Для отбора подобных проекций производится пространственное восстановление всех следов. После этого на основании различных критериев и известной топологии события отбираются следы данного события. И, наконец, все следы экстраполируются к вершине события, где они должны пересекаться в некоторой ограниченной области, что является последним тестом согласования следов.

Система с нулевым управлением. В режиме работы с нулевым управлением пленка человеком не просматривается, а сразу поступает на сканирующее устройство. Каждый снимок сканируется прибором, и вся информация снимка (50 000—100 000 пар координат) передается в ЭВМ, на которой производится полный цикл обработки снимка. Такая система, например DAPR, создана в Беркли [20]. Рассмотрим эту систему DAPR-DIGITAL AUTOMATIC PATTERN RECOGNITION более подробно. Система программ обработки, написанная для ЭВМ типа IBM 7094 II, с которой прибор НРD работает на линии, состоит из нескольких частей с различными приоритетами.

Программа с наивысшим приоритетом — это программа слежения за следом, которая работает в реальном масштабе времени, чтобы уже при самом сканировании уменьшить количество записываемой на накопитель информации. Поиск следов производится методом выделения цепочек пузырьков. Для каждого найденного элемента следа открывается дорожка, и дальше ведется прослеживание по окружности или по параболе. В результате этой довольно сложной процедуры для каждого следа выдаются 18 усредненных точек и информация о плотности следа. Таким образом, объем информации снимка существенно сокращается и представляется теперь в виде следов, реперных крестов и т. д.

Следующий этап обработки — это нахождение вершин событий. Сначала определяются кандидаты вершин на каждой проекции из множества конечных точек найденных следов в ограниченных областях. С помощью этих кандидатов производится реконструкция вершин в пространстве и окончательно отбираются истинные вершины событий. Затем программа TRACK MATCH отбирает следы на стереопроекциях, принадлежащие к данной вершине. В результате всей этой процедуры составляется магнитная лента, которая содержит все найденные следы в виде наборов пар координат и список вершин с указанием относящихся к каждой вершине следов. Эта лента (DAT, DATA ABSTRACT TAPE) является дискретным эквивалентом снимка. В дальнейшем в зависимости от физической задачи по соответствующим критериям из этой

ленты выбираются нужные события для конкретного физического эксперимента. В качестве другого примера рассмотрим систему с нулевым управлением, созданную в Мюнхене [21]. Существенным отличием этой системы (BRUSH) от системы DAPR является то, что для поиска элементов следов и для прослеживания следов разработана специальная, очень быстрая, электронная система. В реальном масштабе времени эта система принимает данные со сканирующего устройства и методом гистограммирования под различными углами наклона находит элементы следов. Для прослеживания следов связываются соответствующие элементы в последующих кусках, и через них проводится парабола. Эта парабола принимается за часть истинного следа, если отклонения элементов от нее достаточно малы. После того, как HPD просканировал следующий кусок, эта парабола экстраполируется, и прежде всего ищутся точки в куске, лежащие в некоторой дорожке вблизи параболы. Затем опять производится гистограммирование остальных точек в этом куске с помощью быстрой электроники. Следующие этапы обработки (TRACK MATCH и т. д.) уже проводятся программным путем.

На основании приведенных выше примеров можно сформулировать основные характеристики использования оптико-механических сканирующих устройств.

1. Сканирование снимка производится по жестко заданной программе, и прибор выдает всю информацию о просканированном снимке (или его части).

2. Первой, и самой сложной и ответственной, задачей обработки является существенное сокращение информации. Для этого имеются различные методы, отличающиеся по степени управления этим процессом со стороны человека: а) полное управление. Человек отбирает полезные снимки (первое сокращение информации). Он задает сравнительно узкие полоски на снимке, внутри которых должны находиться точки, рассматриваемые в дальнейшем (второе сокращение информации). При помощи полосок человек задает и топологию событий, и области поиска следов (уменьшение операций); б) минимальное управление. Человек отбирает снимки с событиями (первое сжатие информации), и задает вершины событий и топологию (уменьшение операций); в) нулевое управление. Прибором анализируется вся информация на каждом снимке. В системе DAPR ЭВМ в реальном масштабе времени находит элементы следов (первое сжатие информации) и записывает их в накопитель. В системе BRUSH специализированная электронная схема в реальном масштабе времени находит элементы следов и сами следы (первое сжатие информации) и записывает их в накопитель.

Электроннооптические сканирующие устройства. В электроннооптических сканирующих устройствах сканирующее световое

пятно создается с помощью прецизионной электроннолучевой трубки. Существенным отличием таких устройств от сканирующих устройств типа НРД является управляемость светового пятна. Оно может быть переведено из любой точки экрана трубки в любую другую точку, например, по команде от ЭВМ. Таким образом, в данном случае сам снимок может служить памятью, содержащей всю информацию снимка, а вычислительная машина может использовать световое пятно в качестве щупальца для выборки нужной

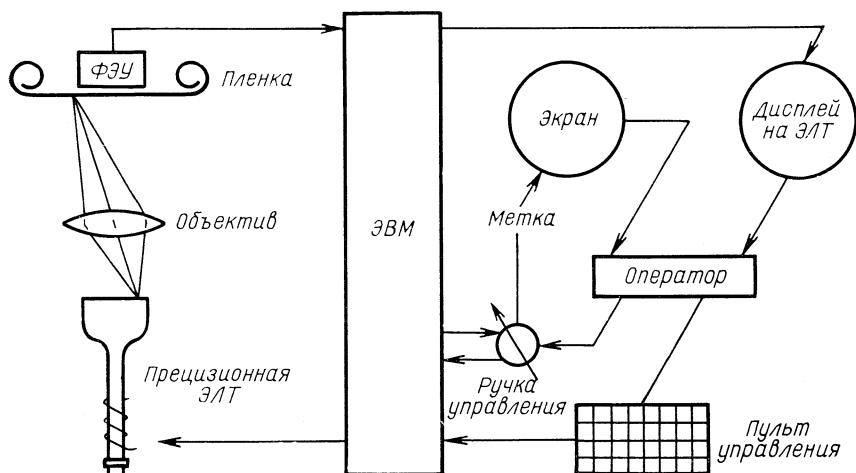


Рис. 13. Принципиальная схема устройства на электроннолучевой трубке POLLY-II.

ей информации. Поэтому в этих устройствах нет четкого разделения по времени между снятием информации со снимка и обработкой. Снимок сканируется и обрабатывается по кускам, причем обработка следующего куска зависит от данных, полученных в предыдущих кусках, и обрабатываемая первичная информация снимка, таким образом, уже в процессе сканирования все время уменьшается.

Устройства с электроннолучевыми трубками были разработаны в различных лабораториях и известны под названием POLLY-II [22], PEPR [23], COCCINELLE [24], PANGLOSS [25], LUCIOLE [26], LUCY [27], ERASME [28].

Рассмотрим принцип работы данных устройств на примере работы POLLY-II. Принципиальная схема этого устройства показана на рис. 13. Положением светового пятна на экране трубки управляет ЭВМ типа SIGMA [7]. В составе прибора имеются

два дисплея и пульт управления для оператора. Один дисплей представляет собой экран, на который проецируется изображение обрабатываемого снимка. На второй дисплей выводится информация со снимка, снятая при помощи светового пятна и обработанная в ЭВМ. Используя ручку управления типа TRACK BALL, оператор может перемещать метку по экрану дисплея и тем самым давать вспомогательные указания, если такие потребуются.

В зависимости от сложности эксперимента и обусловленного этим участия оператора в обработке прибор может работать в различных режимах управления, вплоть до нулевого управления. Однако при любом режиме работы прибора оператор имеет возможность вмешиваться в процесс обработки на всех этапах. Рассмотрим, как реализован режим с нулевым управлением.

Прежде всего следует отметить, что в POLLY-II процесс нахождения следа и процесс измерения координат точек на следах разделены. Поиск событий начинается с того, что находится и идентифицируется один реперный крест, с помощью которого определяется координатная система снимка. После этого производится сканирование в той области снимка, где пучок ускоренных частиц входит в камеру. Линии сканирования направлены примерно по направлению следов. С каждой линии сканирования можно получить только один сигнал. Таким образом, это сканирование представляет собой гистограммирование параллельно направлению пучка. Каждый найденный таким способом кандидат следа затем прослеживается по направлению к краю камеры, и по его наклону и кривизне определяется принадлежность к пучку. В случае положительного решения производится прослеживание этого следа в области камеры экстраполяцией с учетом найденного наклона и кривизны. Любое изменение кривизны следа или его потеря рассматривается как обнаружение вершины события. После того, как все первичные следы определены, вокруг каждой возможной вершины события осуществляется поиск следов, и если обнаруживаются сигналы следов, делается попытка проследить за этим следом в радиальном направлении от вершины. После нахождения необходимого числа следов в данной вершине событие считается определенным, и дальше производится измерение координат точек на следах.

До этого момента вся процедура обработки обычно совершается автоматически. Но после автоматического просмотра снимка часто остаются нерешенные вопросы, с которыми автомат не справляется. Тогда, и это одно из основных преимуществ приборов с электроннолучевой трубкой, оператор может вмешаться в процесс распознавания и дать необходимые вспомогательные указания, управляя меткой и используя пульт управления.

После определения события начинается измерение точек на следах сканированием перпендикулярно направлению следа. Скани-

рование производится по кускам (SLICE SCAN), последующие куски находятся экстраполяцией. Точки одного куска усредняются, и эти значения представляют собой те точки (MASTER POINT), которые используются на следующих этапах обработки.

Следует отметить, что и на этой стадии автоматическая обработка снимка может быть прервана и управление передано оператору.

Таким образом, и в этой системе используются знакомые методы гистограммирования, экстраполяции и т. д. Большим достоинством системы является то, что из-за гибкой структуры аппаратной части и программ здесь сочетается преимущество в скорости автоматической обработки простых и ясных снимков с преимуществом быстрой ориентации человека на сложных снимках.

Специализированные измерительные устройства

Рассмотренные выше сканирующие устройства по сути являются универсальными приборами, пригодными для сканирования и обработки фотографий с других объектов. Специфические свойства снимков с пузырьковых камер фактически слабо влияют на конструкции этих приборов и определяют в основном способ и программу фильтрации информации.

Существует, однако, ряд приборов, принцип работы которых основан на характерных особенностях снимков с пузырьковых камер. Как правило, такие устройства дешевле по стоимости и по затратам на вычислительную технику, хотя их производительность может сравниваться с производительностью сканирующих автоматов. Такими устройствами, например, являются спиральный измеритель SPIRAL READER [29] и SWEEPINK [30].

Спиральный измеритель. Спиральный измеритель представляет собой специализированный сканирующий прибор, принцип работы которого базируется на том факте, что все следы одного события исходят из одной точки (вершины) и расходятся примерно по радиусу, если не учитывать кривизну следов. Поэтому сканирование ведется не прямыми линиями, как в приборах типа HPD и CRT, а по спирали с центром в вершине события (рис. 14). Таким образом, спиральный измеритель менее универсален, чем другие сканирующие устройства, но часть информации о событиях, которая используется в процессе фильтрации (радиальность следов) заложена в аппаратную часть прибора и учитывается уже при съеме первичной информации со снимка. Обработка снимков со спиральным измерителем требует предварительного просмотра пленки с отбором полезных снимков, грубым измерением одного или двух реперных крестов, грубым измерением координат вершины события и указанием топологии события. Таким образом,

в работу спирального измерителя заложен принцип минимального управления.

Аппаратурная часть спирального измерителя работает на линии с ЭВМ. При сканировании снимка центр сканирующей головки на основании информации просмотра выводится командой с ЭВМ в окрестность вершины измеряемого события, а оператор подправляет это положение, устанавливая центр спирали точно $\pm(3-5)$ мкм на вершину. После этого начинается спиральное сканирование, и все найденные точки передаются в ЭВМ. Сканирование ведется с помощью радиальной щели размерами (250×10) мкм². Таким

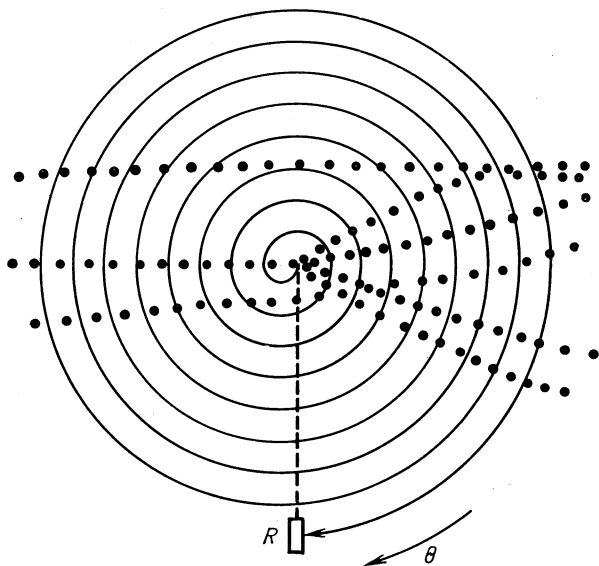


Рис. 14. Принцип спирального сканирования снимка.

образом, используется некоторое аппаратное подобие метода выделения цепочек пузырьков для того, чтобы выделить сигналы, получаемые при пересечении радиальных следов измеряемого события из фона сигналов со следов, не направленных в сторону вершины. Координаты середины сигнала со следа, соответствующие усредненным координатам точек, попадающих в щель при пересечении следа, измеряются в полярной системе координат, т. е. определяется радиус R и угол θ . Началом системы координат является вершина события. Если полученные точки представить в плоскости R, θ_0 , то точки одного следа вблизи вершины представляют прямые линии типа $\theta = \theta_0 + \alpha R$, где θ_0 угол наклона следа вблизи вершины, а α учитывает кривизну следа. Для поиска

следов применяется гистограммирование под разными углами наклона в плоскости на первых оборотах сканирования. Гистограмма строится по линиям $\theta = \theta_0 + \alpha R$, ширина интервалов составляет $3,5^\circ$. Для поворота гистограммы изменяется угол α .

После того, как начальные участки следов определены, производится прослеживание следов. Для этого через найденные точки данного следа методом наименьших квадратов проводится линия типа $\theta = \theta_0 + \alpha R + \beta/R + \gamma R^3$, где β учитывает смещение точек, вызванное аппаратурной частью прибора; γ — потери энергии частиц. В этот процесс последовательно вовлекаются точки, лежащие вблизи продолжения этой линии. Точки, приводящие к небольшим погрешностям, сохраняются, а точки, приводящие к большим погрешностям, отбрасываются. Такая процедура производится с каждым следом и каждой проекцией, а затем с помощью программы TRACK MATCH находят соответствующие одному и тому же следу проекции. Дальнейшая обработка проводится по известным программам геометрической реконструкции.

Таким образом, и при анализе информации, получаемой с помощью спирального измерителя, используются те же методы обработки, что и при использовании других приборов. Отличием является то, что часть методов обработки реализована в аппаратурной форме, и что для осуществления минимального управления человек непосредственно участвует в процессе измерения.

Другим примером высокопроизводительной системы обработки с обязательным участием человека в процессе измерения является SWEEPNIK. В качестве измерительной головки в нем используется вращающееся продольное световое пятно размерами $(1 \times 0,03)$ мм², центр вращения которого двигается по следу. Просмотр заключается в отборе снимков с событиями и в указании топологии событий. Оператор устанавливает центр вращающейся головки на след, а дальше головка двигается по следу автоматически. Как и в спиральном измерителе, продольный сканирующий элемент является аппаратурным осуществлением метода выделения цепочки пузырьков, с помощью которого удается выделить элементы истинного следа (проходящего через центр вращения) из фона всех сигналов. По мере передвижения по следу ЭВМ, с которой связан прибор, может рассчитать угловой интервал, в котором должны находиться следующие точки обрабатываемого следа и, таким образом, задавать дорожку поиска. В работающих приборах не используется метод гистограммирования, так как оператор задает начальную точку следа, хотя для событий с более сложной конфигурацией и с большей энергией первичных частиц это может понадобиться. Режим управления в существующих устройствах является нечто средним между полным управлением и минимальным управлением.

Проблемы при автоматической обработке снимков

Описанные методы и системы обработки снимков эксплуатируются уже в течение многих лет. В основном они обеспечивают необходимую точность измерения и производительность обработки.

На рис. 15 приведены типичные распределения отклонений измеренных точек от найденных следов, а в табл. 1 приведена сводка об эксплуатации ряда приборов [31].

Таблица 1

Система обработки	Лаборатория	Производительность событий/ч	Число измеренных событий за один год
Спиральный измеритель	LRL	100	$0,6 \times 10^6$
HPD	LRL	110	$0,7 \times 10^6$
HPD	BNL	80	$0,5 \times 10^6$
HPD	CERN	50	$0,25 \times 10^6$
HPD	Paris	40	$0,15 \times 10^6$
HPD	Saclay	30	$0,1 \times 10^6$
POLLY-II *	ANL	85	
PEPR	MIT	90	$0,3 \times 10^6$

Как правило, автоматические системы обработки дают хорошие результаты в случае обработки чистых снимков с малым числом первичных следов и простыми событиями. Однако существует ряд причин, которые приводят к значительным затруднениям при распознавании и измерении событий. К таким причинам следует отнести:

1) **короткие следы.** Они, как правило, находятся вблизи вершин событий, т. е. в районе снимка, где имеется наибольшее скопление следов. Сигналов от таких следов будет мало, поэтому

их трудно выделить из фона, тем более, что все методы распознавания основаны на статистических принципах;

2) **следы медленных частиц.** Эти следы сильно искривлены и из-за сильных потерь энергии частицами отличаются от окружностей. Поэтому методы гистограммирования и экстраполяции не всегда дают удовлетворительные результаты. Благодаря высокой плотности таких следов здесь может выручить метод выделения цепочек пузырьков;

3) **наложение следов.** У каждого прибора есть конечная разрешающая способность. Если проекции двух следов на данном снимке расположены за пределами разрешающей способности, то прибор их не различит. То же самое будет в местах пересечения следов. Если на двух других проекциях эти следы хорошо различаются, то в программе геометрической реконструкции эту проблему можно решить. В противном случае такие события нельзя обрабатывать данным прибором;

4) **слабые следы.** По различным причинам некоторые следы или участки следов могут быть существенно менее плотными или менее контрастными, чем другие. Это может привести к тому, что в автоматических приборах такие следы не обнаруживаются или теряются при прослеживании;

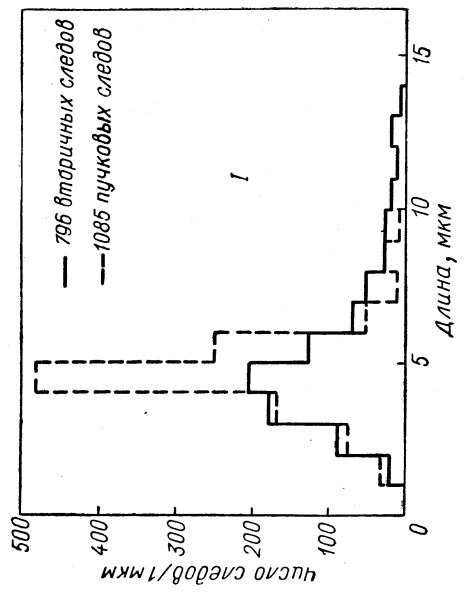
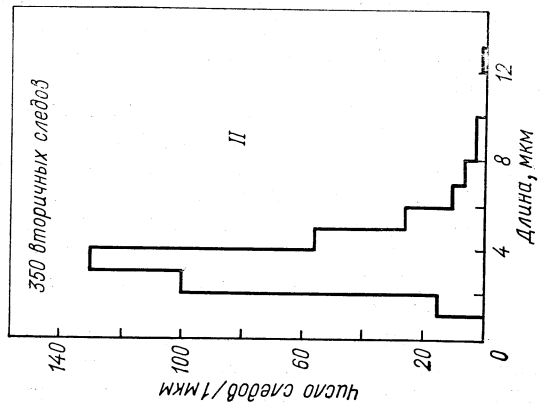
5) **определение вершин событий.** В режиме с нулевым управлением, когда вершина события не измеряется оператором, она находится экстраполяцией следов этого события в область их пересечения. В случае события с малым числом следов или со следами, направленными вперед под малыми углами в лабораторной системе координат, этот метод может привести к существенным погрешностям;

6) **распады и рассеяния на малые углы.** В зависимости от расстояния излома следа от вершины события рассеяние может быть вовсе не обнаружено и может привести к отбраковке нескольких точек или к прослеживанию другого следа. По-видимому, эта проблема разрешима, если принять соответствующие меры и предусмотреть соответствующие жесткие критерии.

Все указанные и, вероятно, ряд других причин могут привести к следующим ошибкам.

1. Не все события данного типа будут найдены.
2. Событие данного типа находится, но неправильно интерпретируется.
3. Находится событие, которое или вовсе не является событием, или является неверно интерпретированным событием другого типа.
4. Событие находится, правильно интерпретируется, но велики погрешности параметров следов.

Вследствие этого физические результаты искажаются как качественно, так и количественно.



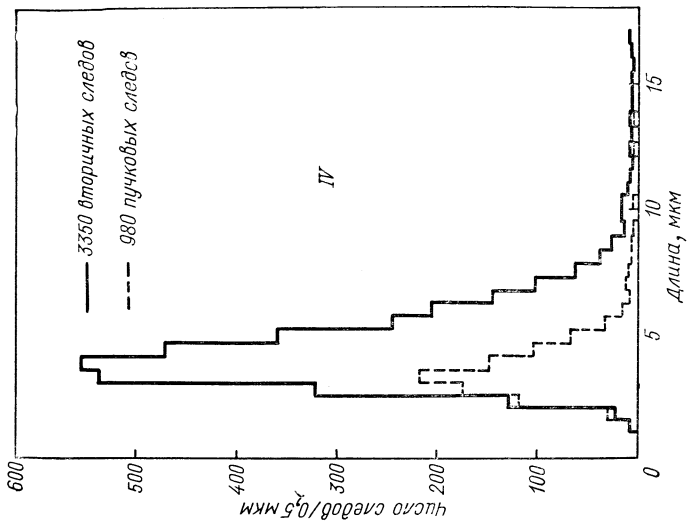
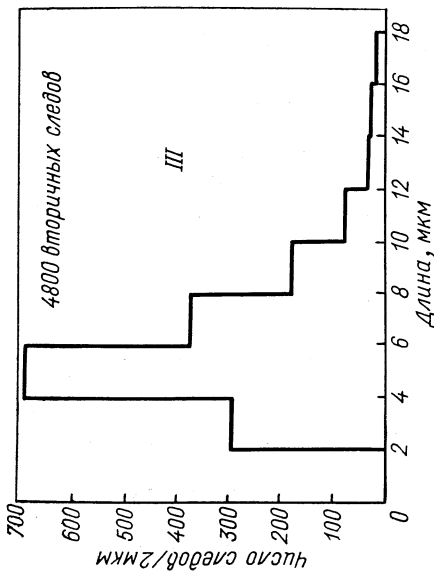


Рис. 15. Распределение средних отклонений измеренных точек от найденного следа для различных измерительных приборов:

I — измерение на НРД событий К-р при 10 Гэв/с; II — измерение на спиральном измерителе событий П-р при 3,9 Гэв/с; III — измерения на приборе SWBERNICK событий шаг 8 Гэв/с; IV — измерение на приборе ZMP событий К-р при 10 Гэв/с.

Для того чтобы преодолеть эти трудности и неоднозначности при автоматической обработке снимков, часто используется техника дисплея. На различных стадиях обработки (при фильтрации, TRACK MATCH, геометрической реконструкции) данные в соответствующей форме выводятся вычислительной машиной на экран дисплея, на котором оператор с помощью светового карандаша может внести необходимые поправки, дополнения, изменения. В большинстве случаев на экране дисплея воспроизводится данный снимок или данный след в виде светлых пятен, соответствующих измеренным точкам.

При работе со спиральным измерителем точки выводятся в системе координат $R\theta$. Как было показано, в приборах с электроннолучевой трубкой дисплей находится в распоряжении оператора и ЭВМ в течение всего процесса обработки. При работе со сканирующими приборами НРД работа с дисплеем проходит off-line: во время фильтрации неясные события отбираются, и их обработка с помощью дисплея является отдельным процессом.

В некоторых случаях, однако, требуется и повторное, ручное измерение сложных событий. Это сильно понижает производительность и вызывает существенные трудности в организации процесса обработки, так как для одного эксперимента могут обрабатываться десятки и даже сотни тысяч событий. Поэтому внимание все более сосредоточивается на том, чтобы из систем обработки почти полностью исключить систематические погрешности, связанные со сложными событиями. В таком случае можно просто не учитывать возможность их появления. К сожалению, приведенные выше причины, приводящие к трудностям при автоматической обработке, как правило, связаны с определенными конфигурациями событий. Поэтому вероятность внесения систематических погрешностей из-за таких событий все же велика, и вопрос о реализации нулевого управления измерения в настоящее время остается весьма спорным.

Измерение ионизирующей способности частиц

Для идентификации частиц в интервале импульсов от 0,9 до 1,8 Гэв/с в водородных пузырьковых камерах определяется ионизирующая способность частиц, которая непосредственно отражается на распределении пузырьков, сгустков пузырьков и разрывов между ними.

В ряде лабораторий были созданы специальные приборы для измерения ионизирующей способности частиц [32 — 34]. В них обычно след прослеживается в узких пределах, и при этом измеряется пройденная длина и появление каждого пузырька или сгустка. На основании этой информации можно построить желаемые дифференциальные и интегральные распределения, из кото-

рых определяется ионизирующая способность частицы и, привлекая измеренный импульс, ее масса. Степень автоматизации в таких устройствах различна. Применяются приборы с ручным передвижением столика с пленкой и визуальным определением прохождения пузырька через измерительную метку [33] и приборы с автоматическим прослеживанием следа и автоматическим определением появления пузырька [34].

В сканирующих устройствах основной величиной для определения ионизирующей способности частиц является отношение числа пересечений пузырьков линией сканирования (N_B) к общему числу пересечений данного следа (N_T). Эту величину связывают с ионизирующей способностью частицы в предположении пуассоновского распределения [35]. Основной трудностью этого метода является то, что величина пузырьков и разрывов зависит от многих факторов: от освещенности камеры, от глубины следа в камере, от угла наклона следа к направлению сканирования, от термостатического режима в камере. Отношение N_B/N_T , следовательно, может быть различным для разных участков следа, для различных снимков и пленок. Поэтому измерение ионизирующей способности всегда производится относительно ионизирующей способности релятивистской частицы с минимальной ионизацией. Кроме того, приходится экспериментально, по результатам измерения следов известных частиц с определенными импульсами, подбирать ряд поправок, учитывающих эти эффекты.

Совершенно иной метод измерения ионизирующей способности применяется в спиральном измерителе. Здесь непосредственно измеряется плотность следов по амплитуде импульсов, получаемых при прохождении сканирующей щели через след. Для исключения колебаний фона, от которых эта величина существенно зависит, используется автоматическое регулирование усиления сигналов (см. разд. 2). Так как радиальное направление щели и направление следа по мере удаления от вершины события постепенно расходятся, величина сигнала со следа уменьшается. Поэтому измерение ионизации производится только на первых оборотах щели (8 см в камере в Беркли).

Хорошие описания и сравнения результатов этих методов приведены в работе [36].

Проблемы, связанные с обработкой снимков с больших камер

В настоящее время в действие вступает новое поколение пузырьков камер — многокубовые камеры. В связи с обработкой снимков с этих камер возникает целый ряд трудностей, не присущих классическим камерам.

1. Так как в этих камерах, несмотря на широкоугольную оптику (рыбы глаза), ни один объектив не перекрывает всю камеру, число проекций растёт (до восьми в камере «Мирабель») и отдельные следы или участки следов приходится изучать на различных снимках. Возникает новая проблема «сшивания» следов.

2. Благодаря широкоугольной оптике возникают заметные искажения изображений следов, и они уже не соответствуют простым окружностям или параболом.

3. Контрастность следов относительно фона уменьшается.

4. В связи с переходом к большим энергиям первичных частиц конус вылета частиц суживается. Таким образом, увеличивается вероятность наложения следов на снимках, особенно в районе вершины.

Эти особенности снимков с больших камер сильно затрудняют обработку. По-видимому, здесь потребуется приложить довольно большие усилия, чтобы найти оптимальные условия для обработки с разумной производительностью. Судя по опыту работы приборов с электроннолучевыми трубками, эти устройства наиболее гибкие, и можно надеяться, что со временем они справятся и с этой задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. TC Program Library, V. 1, 2, 3, CERN, 1968.
2. Marciano F. CERN-DD/DA/65/18.
3. Dension C. A. LRL, UCID 2991-1, 1968.
4. Fontaine G., Reboul G. International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics, CERN 70—21, 1970.
5. Blair W. M. R. CERN-DD/DA/68/9.
6. Purdue Conference on Instrumentation for High-Energy Physics, Lafayette, Indiana, 1965.
International Conference on Instrumentation for High-Energy Physics, Stanford, California, 1966;
International Conference on Programming for Flying Spot Devices, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Munich, 1967;
International Conference on Advanced Data Processing for Bubble and Spark Chambers, Argonne National Laboratory, ANL-7515, 1968;
International Colloquium on PEPR, University of Nijmegen, 1968;
International Conference on Data Handling Systems in High-Energy Physics, Cavendish Laboratory, Cambridge, CERN 70—21, 1970;
International Symposium on Data Handling for Bubble and Spark Chambers, Dubna, 1971.
7. Ваттенбах К. и др. ПТЭ, 1968, № 4, 41.
8. Ляйсте Р., Липшольдт Х., Позе Р. А. ПТЭ, 1968, № 4, 44.
9. Материалы II Симпозиума по ядерной радиоэлектронике, Дубна, Препринт ОИЯИ, 2205, 1964.
10. Alston M., Franck J.-V., Kerth L. T. Bubble and Spark Chambers. Vol. 2. N.Y., Academic Press, Inc., 1967.
11. Ермолаев В. В. и др. Тр. Международного симпозиума по вопросам автоматизации обработки данных с пузырьковых и искровых камер. Препринт ОИЯИ, Д-10-6147, 1971.

12. Bähr J. e.a. Preprint Institut für Hochenergiephysik, DAW, PHE 72-1, 1972.
13. Tausch L. A. CERN-DD/DH/69/2.
14. Albrecht H. C. e.a. LRL, UCRL-18528, 1968.
15. Hough P. V. C., Powell B. W. Nuovo cimento, 1960, 18, 1184.
16. Moorhead W. G., Krischer W. Proc. Conference. Programming for Flying Spot Devices, Bologna, CERN 65-11, 1965.
17. Crennell D. J. e.a. Proc. Conference. Programming for Flying Spot Devices. N.Y., Columbia University, 1965.
18. Burd D. e.a. International Conference on Programming for Flying Spot Devices. Munich, Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, 1967.
19. Equer B. e.a. Proc. of the Conference on Programming for Flying Spot Devices. N.Y., Columbia University, 1965.
20. White H. S., Hall D. E. LRL, UCRL-19210, 1969; White H. S., Hall D. E. LRL, UCRL-19723, 1970.
21. Billing H. e.a. CERN 70—21, 1970.
22. Allison W. W. M. e.a. ANL, HEP 7007, 1970.
23. Watts T. L. CERN 70—21, 1970.
24. Equer B., Fontaine G., Reboul G. CERN 70—21, 1970.
25. Antoine P. e.a. CERN 70—21, 1970.
26. Anders H., Lingjaerde T., Wiskott D. Proc. Intern. Symposium on Nucl. Electronics. Paris, 1963.
27. Anders H. e.a. CERN 70—21, 1970.
28. Lord D., Quercigh E. CERN-DD/DH/70/20.
29. Brandon D. e.a. CERN 70—21, 1970; Alvarez L. W. Proc. Informal Meeting on Track Data Processing. CERN 62—37, 1962.
30. Frisch O. R. Proc. of a Seminar on Future Development of Automatic Bubble Chamber Film Measurement, Rutherford Laboratory, RHELIR 183, 1968.
31. Mulvey. Intern. Symposium on Nucl. Electr. Versailles, 1968.
32. Batagui M. Proc. of the Intern. Symposium on Data Handling of Bubble and Spark Chambers, Dubna, 1971.
33. Lorenz E. Purdue Conference on Instrumentation for High-Energy Physics, Lafayette, Indiana, 188, 1965.
34. Strand R. C. BNL Bubble Chamber Report G-34, 1963.