

4840 + 4840

Ш-559

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2476



В.Н. Шигаев

ОБ ОДНОМ СКАНИРУЮЩЕМ АВТОМАТЕ ДЛЯ
МАЛОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
МАШИНЫ

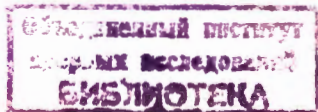
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

1965

В.Н. Шагаев

ОБ ОДНОМ СКАНИРУЮЩЕМ АВТОМАТЕ ДЛЯ
МАЛОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
МАШИНЫ

3936/3 чф.



В настоящее время техника физического эксперимента достигла уровня, позволяющего получать с пузырьковых камер в год сотни тысяч фотоснимков с событиями, подлежащими измерению и математической обработке. Рабочий объем пузырьковой камеры фотографируется несколькими стереофотоаппаратами, а при просмотре фотоснимков отбираются для измерения подходящие стереопары.

Одним из путей автоматизации процессов измерения и просмотра фотоснимков явилось создание сканирующих измерительных автоматов (СА), непосредственно связанных с электронными вычислительными машинками (ЭВМ).

В качестве элемента, которым производится просмотр (сканирование) снимка, в автоматах типа НРД ^{/1,2/} выбрано световое пятно ("точка") с поперечником 10-12 микрон. Сканирование осуществляется построчно вдоль параллельных линий, пересекающих весь кадр. При пересечении изображения пузырька трека световым пятном производится отсчет координат, соответствующих середине пузырька.

По ряду соображений при сканировании задается большая плотность строк (порядка 2000 на снимок), при которой с отсчетных каналов СА поступают координаты большинства пузырьков на снимке. Поэтому, вообще говоря, можно создать программы, осуществляющие полный анализ фотоснимка: поиск нужного события, измерение его координат и их математическую обработку ^{/4-6/}. При общем значительном объеме числового материала, достигающем 20-50 тысяч пар координат с одного фотоснимка, доля полезной информации находится на уровне нескольких процентов. Поэтому задача полной автоматизации обработки фотоснимков с пузырьковых камер предъявляет высокие требования к основным характеристикам вычислительной машины.

Накопленный опыт ^{/5,8/} показывает, что при оперативной памяти машины в несколько десятков тысяч слов и быстроте действия в несколько десятков тысяч операций в секунду оптимальной является автоматизация только этапов измерения и математической обработки событий, так как без какой-либо дополнительной информации поиск события на снимке требует значительных затрат машинного времени. В этом случае отбор фотоснимков для измерения осуществляется физиками и просмотрщиками на специальных просмотрных столах. Дополнительную информацию к каждому стереоснимку можно задавать различными способами и перед началом сканирования вводить в СА или ЭВМ.

Такой информацией может служить рисунок-схема для следящего устройства СА, окрашивание негатива вдоль треков события либо, наконец, числовой материал ("математическая маска"), вводимый в ЭВМ перед началом сканирования. Последний способ более гибок, т.к. легко позволяет изменять объем и содержание дополнительной информации в зависимости от типа используемой ЭВМ, алгоритмов программы и особенностей самого автомата. В этом случае просмотрные столы становятся просмотрно-измерительными.

Параметры вычислительной машины, особенно малой, в значительной степени определяют оптимальность выбранной конструкции СА и метода сканирования. К сожалению, машина М-20 оказалась неудобной для стыковки непосредственно со сканирующим автоматом. В машине отсутствует система прерывания, а отсюда-трудности, связанные с привязкой работы машины к реальному времени. Объем оперативной памяти М-20 для такой задачи недостаточен, а наличие барабанов не спасает положения, т.к. время доступа к ним сравнительно велико.

Свой выбор мы остановили на малой полупроводниковой двухадресной ЭВМ "Минск-22", обладающей оперативной памятью в 8 тысяч 37-разрядных слов, быстродействием порядка 5 тысяч операций в секунду и возможностью прерывания программ. При таких параметрах вычислительной машины приходится, естественно, отказываться от известных вариантов сканирующего автомата, если мы не желаем ограничиться методической стороной дела. И хотя реализация любого варианта СА, связанная с решением серьезных технических и математических задач, сама по себе весьма ценна, основные усилия были направлены на разработку такой схемы сканирования и отбора информации, которая обеспечивала бы максимальную производительность автомата.

Можно в некоторой степени компенсировать сравнительно невысокие параметры машины "Минск-22", отказавшись от сканирования фотоснимков "точкой" и перейдя к сканированию снимка аналоговым элементом-отрезком прямой, аппроксимирующим короткие сегменты треков. В работе^{/3/} предлагалось узкие полосы фотоснимка сканировать последовательностью щелей, имеющих различный наклон, например, через каждые 3° . Поскольку эти углы должны заполнять сектор не менее 90° , всего потребовалось бы около 30 щелей. Таким образом, вместо обычных 20-30 сканов световым пятном, требуемых на каждый миллиметр фотоснимка, предлагалось делать 30 сканов различными щелями. Выражалась надежда, что в результате пересечения отрезка трека такой последовательностью щелей мы получим в среднем два отсчета, соответствующих тем щелям, наклон которых ближе всего к наклону данного элемента трека. Если бы это было действительно так, то объем числового материала, поступающего с отсчетных каналов СА, уменьшился бы почти в десять раз, а номер щели, при сканировании которой произошел отсчет, характеризовал бы наклон трека в данной окрестности с точностью в несколько градусов. Последнее обстоятельство было бы особенно ценным при работе СА в режиме самостоятельного отбора фотоснимков с нужными событиями.

Для машины М-20 была составлена программа, моделирующая работу отсчетного устройства СА при некоторых упрощающих предположениях. На пленке изображение щели берется в виде равномерно освещенного прямоугольника S_1 , а трек - в виде кольца S_2 с внешним радиусом $R + \frac{1}{2}d$ и внутренним $R - \frac{1}{2}d$. Оптическая плотность трека предполагается постоянной (см. рис. 1). Входными параметрами программы являются: длина щели l и ее ширина δ , координата X центра щели, угол наклона щели ϕ , радиус кривизны трека R и его ширина d . При сканировании координата Y центра щели остается постоянной, а координата X возрастает линейно по времени: $X = vt$, где v - скорость развертки щелей. В сделанных предположениях величина сигнала $i(t)$, поступающего на вход фотоэлектронного умножителя СА, пропорциональна площади $S_1 \wedge S_2$. Для различных значений входных параметров были вычислены кривые $i(t)$ и найдены амплитуды $I = \max i(t)$. На рис. 2 представлено несколько кривых $I(\phi)$ для разных значений R и d . Эти графики характеризуют избирательность щели при простом отсчетном устройстве СА, анализирующем только амплитуду сигнала. Порог отсчета сигнала должен быть при этом достаточно низким из-за различной плотности ионизации треков и различных условий для фотографирования в пределах рабочего объема пузырьковой камеры. Как показывает анализ полученных графиков, при низком пороге отсчета щель обладает плохой избирательностью по углу, так что при сканировании снимка последовательностью щелей разного наклона ($\Delta\phi = 3^\circ$) мы получили бы с каждого миллиметра трека не одну-две точки, а в несколько раз больше. Например, при пороге в 20% от максимальной амплитуды сигнала среднее число точек с одного миллиметра плотного трека шириной 20μ равно четырем, а для трека шириной 40μ - восьми. Для плотных следов шириной 60μ щель при таком пороге вообще теряет избирательность.

Все же и при низком пороге отсчета можно получить достаточную избирательность, если на СА анализировать не только амплитуду сигнала I , но и ширину сигнала $i(t)$ на уровне порога отсчета. Лучшая избирательность достигается в более сложных отсчетных устройствах, анализирующих форму сигнала $i(t)$ /7/.

Ввиду сравнительно небольшого объема оперативной памяти целесообразно во время работы сканирующего автомата анализировать на машине "Минск-22" информацию по мере ее поступления, оставляя в оперативной памяти координаты только тех точек, которые попадают в окрестности треков измеряемого события. Такую операцию мы называем отбраковкой по маске, т.к. область, где ищется трек события, находится программным путем по "математической маске" события.

Объем числового материала, поступающего с отсчетного устройства при сканировании щелью, в несколько раз меньше, нежели при сканировании "точкой". Но надо иметь в виду, что на отбраковку по маске равно по объему числового материала

требуется в случае сканирования щелью примерно в два раза больше машинного времени. Объясняется это тем, что при сканировании "точкой" мы получаем с одного скана сравнительно большие группы точек, упорядоченных по одной из координат. Это обстоятельство позволяет в случае сканирования "точкой" построить более экономный алгоритм отбраковки.

Вариант сканирующего автомата для ЭВМ "Минск-22"

При использовании малой вычислительной машины, какой является "Минск-22", схема управления автоматом и производительность системы в целом сильно зависят от конструкции сканирующего автомата. Были рассмотрены различные варианты автомата. Выяснилось, что наибольшая производительность достигается в случае, когда максимально снижено поступление на вход вычислительной машины информации, не имеющей отношения к измеряемому событию. В таком варианте информация подвергается частичной отбраковке на самом сканирующем автомате в момент отсчета координат. Параметры отбраковки вычисляются машиной "Минск-22" и выдаются на регистры сканирующего автомата перед началом сканирования очередной полосы фотоснимка.

Основные черты этого варианта сканирующей измерительной системы характеризуются следующими моментами:

1. Машина "Минск-22" имеет прямую двухстороннюю связь с вычислительной машиной М-20 и сканирующим автоматом. Такая система связи, обеспечивающая двухсторонний обмен информацией, разработана силами Вычислительного центра ОИЯИ для однотипной машины "Минск-2" и к настоящему времени уже сдана в эксплуатацию.
2. Управление автоматом осуществляется машиной "Минск-22" путем выдачи на сканирующий автомат команд управления. Для машины "Минск-22" команды управления представляют собой обычные коды, подаваемые из оперативной памяти на регистры автомата. Дешифратор этих команд находится на сканирующем автомате.
3. В задачу машины "Минск-22" входит: управление автоматом, вычисление параметров отбраковки перед началом сканирования очередной полосы фотоснимка и выдача их на сканирующий автомат, считывание информации с буфера автомата и ее первичная обработка. Последняя включает в себя выброс "плохих" точек, проверку качества измерения события на каждом из снимков и приведение результатов измерения к виду, допускающему в дальнейшем их обработку на машине М-20 по существующим программам обработки треков.
4. Фотоснимок сканируется последовательностью щелей, имеющих различный угол наклона. Режим управления автоматом строится с учетом такой особенности СА, как

механический барабан развертки щелей. Расположение щелей на механическом барабане согласовано с его движением в процессе сканирования таким образом, что за время одного оборота барабана все щели последовательно одна за другой сканируют одну и ту же полосу снимка.

Предполагается, что один оборот барабан будет совершать за время порядка 0,1сек. Причем около 90 мсек тратится на собственно сканирование щелями и измерение координат, а остальные 10 мсек составляют так называемый "темный" промежуток времени между сканированием соседних полос пленки. В течение "темного" промежутка, как правило, происходит основной обмен информацией: считывание измеренных координат с буфера автомата и выдача параметров отбраковки на регистры сканирующего автомата.

На рис. 3 и 3а представлена блок-схема программы управления сканирующим автоматом. Предполагается, что сканирующий автомат "понимает" и выполняет 7 команд, выдаваемых вычислительной машиной.

После того, как закончена обработка предыдущего события, "Минск-22" считывает с магнитной ленты следующий массив с математической маской и служебной информацией. После анализа этого материала на сканирующий автомат выдается команда

1. "Н а с т р о й к а".

Эта команда содержит номер кадра киноплёнки, номер проекции события, направление сканирования и скорость сканирования. По этой команде на СА производится поиск и подвод нужного кадра киноплёнки. Автомат настраивается на сканирование заданной проекции стереоснимка в указанном направлении. Информацию о настройке СА принимает на специальные регистры, а вычислительная машина переходит к выполнению следующих команд программы, не дожидаясь окончания настройки автомата. После выполнения всех операций настройки автомат подает сигнал на регистр причин прерывания машины "Минск-22", и машина через блок "Диспетчер" возвращается к программе управления сканирующим автоматом.

Сигналом к включению на СА мотора и переходу в режим сканирования является команда

2. "С к а н и р о в а н и е",

выдаваемая после окончания операций настройки. Отсчет координат на СА, их отбраковка и запись в буферную память автомата начинается только после команд

3. " П е р е д а ч а м а с к и "

и заканчивается по окончании сканирования текущей полосы снимка (с наступлением

ближайшего "темного" промежутка). По этой команде, выдаваемой обычно перед началом сканирования очередной полосы снимка, автомат принимает на свои регистры коды маски. Каждый код маски соответствует одному отрезку трека, подлежащему измерению в данной полосе снимка, и несет в себе два параметра отбраковки: номер щели N (5 двоичных разрядов) и координату X (12 двоичных разрядов). Схемы сравнения на автомате разрешают отсчет координат при сканировании N -й щелью лишь в окрестности координаты X . Поскольку мы ограничиваем себя сверху десятилучевыми со- бытиями, то на СА достаточно иметь возможность принимать до 10 кодов маски. Чтобы упростить использование на СА кодов маски, следует, учитывая особенности рассмат- риваемого варианта автомата, выдавать из ЭВМ упорядоченную последовательность ко- дов маски. На регистры автомата они должны выдаваться в порядке возрастания номе- ров щелей N_i , а группы кодов с одинаковыми N_i - в порядке возрастания коор- динат X_i .

Координаты точек, отсчитанные в окрестностях X_i при сканировании N_i -ми щелями, записываются в небольшую буферную память автомата (на двадцать 37-разряд- ных слов). Для снижения последующих затрат машинного времени в четырех двоичных разрядах каждого кода маска указывается логический номер трека, присвоенный данно- му треку программой ЭВМ. Этими же признаками метятся координаты, записываемые в буферную память СА.

Информация из буферной памяти СА выдается по команде

4. " С ч и т ы в а н и е с б у ф е р а "

Если буфер автомата открыт для считывания, то в "Минск-22" передаются записан- ные коды. Первым идет код, содержащий n - число записанных кодов. Окончание опе- рации считывания блокирует буфер для считывания. Блокировка снимается после заверше- ния сканирования следующей полосы снимка (с наступлением ближайшего "темного" промежутка). Если вычислительная машина выйдет на команду "Считывание с буфера" в момент, когда буфер еще заблокирован, то произойдет временный останов машины вплоть до момента снятия блокировки.

В процессе сканирования каждого снимка координата Y_j центра сканируемой по- лосы пленки меняется скачками: $\Delta Y = 1$ мм. Между Y_j и номерами полос снимка имеется взаимнооднозначное соответствие, поэтому на СА будет отсчитываться не Y_j , а номер сканируемой полосы.

Для синхронизации работы ЭВМ и СА и более полного использования машинного времени вводится команда

5. " П р е р ы в а н и е п о н о м е р у п о л о с ы " .

По этой команде сканирующий автомат принимает на соответствующий регистр номер полосы прерывания. На автомате ведется сравнение номера полосы прерывания с номером текущей полосы. При их совпадении подается сигнал на регистр причин прерывания машины "Минск-22".

Выбор механического узла для получения и развертки шелей означает, что каждая полоса пленки сканируется фактически всем набором шелей, хотя используются для измерения только те из них, которые указаны в кодах маски, передаваемых на СА перед сканированием очередной полосы снимка.

Пока автомат производит измерения на текущей полосе снимка, вычислительная машина обрабатывает информацию, полученную с предыдущей полосы, и подготавливает маску для следующей. На эти операции в распоряжении ЭВМ будет около 90 мсек (при сканировании со скоростью 10 полос/сек). Для каждого конкретного снимка скорость сканирования задается управляющей программой. Поэтому в распоряжении ЭВМ будет достаточно времени для выполнения этих операций. В случаях же запаздывания ЭВМ вопрос о том, передавать маску на СА или нет, решается в зависимости от соотношения между номером щели, взятым из первого кода маски, и номером той щели, которая сканирует снимок в данный момент. Команда

6. " С ч и т ы в а н и е н о м е р а п о л о с ы и н о м е р а щ е л и " .

позволяет уточнить состояние автомата в любой момент времени. По этой команде автомат выдает вычислительной машине с соответствующих регистров текущие значения номеров полосы и щели.

Сканирование с данной настройкой, отбраковка координат и запись их в буферную память автомата прекращаются по команде

7. " К о н е ц с к а н и р о в а н и я " .

Наконец, одна из команд машины "Минск-22" может быть задействована как "Ждущий останов". Останов машины при выходе на эту команду длится, пока нет вызова ни с одного из объектов, с которыми машина имеет прямую связь. Появление хотя бы одного сигнала вызова осуществляет пуск машины.

Оценка производительности автомата

Во время сканирования фотоснимка вычислительная машина "Минск-22" будет тратить время в основном на вычисление параметров маски, считывание информации с буфера СА и запись ее в соответствующие зоны оперативной памяти.

По специальным маркерам каждый снимок перед началом сканирования должен устанавливаться в определенное положение с точностью не ниже 0,5 мм. Такая точность установки снимка необходима для того, чтобы параметры первых кодов маски, выдаваемые машиной на регистры автомата, соответствовали координатам реперных крестов снимка с точностью до полуширины коридора маски.

После того, как просканированы первые несколько полос фотоснимка, "Минск-22" находит точные значения координат реперных крестов и приводит математическую маску события к системе координат сканирующего автомата. При сканировании последующих полос фотоснимка коды маски выдаются в системе координат сканирующего автомата.

Подготовка маски включает в себя:

1. Анализ обстановки на следующей полосе фотоснимка.
2. Вычисление X -координат кодов маски.
3. Определение углов ϕ_1 наклона треков в точках пересечения с линией сканирования.
4. Определение номеров щелей N_1 по найденным углам ϕ_1 .
5. Упорядочение кодов маски по параметрам N_1, ϕ_1 .

Для машины "Минск-22" были получены оценки времени работы тех блоков программы, которые в основном определяют производительность машины. Время, затрачиваемое вычислительной машиной на все операции, выражается следующей приближенной формулой (в расчете на одну полосу фотоснимка):

$$T(p_0, p, m) = p_0 + 10p + 0,65p^2 + m,$$

где:

p_0 — общее число треков, подлежащих измерению при сканировании снимка с данной настройкой;

p — число треков, подлежащих измерению в данной полосе фотоснимка;

m — число точек, измеренных на предыдущей полосе фотоснимка; время T — в миллисекундах.

Из этой оценки следует, что время, затрачиваемое вычислительной машиной при сканировании одного миллиметра снимка, будет порядка

$$T(3,3,3) = 40 \text{ мсек для 3-лучевых событий,}$$

$$T(5,5,5) = 80 \text{ мсек для 5-лучевых событий,}$$

$$T(10,10,10) = 180 \text{ мсек для 10-лучевых событий.}$$

Это означает, что многие из 100-миллиметровых кадров с 3-, 5- и 10-лучевыми событиями не могут быть просканированы в некоторых направлениях быстрее чем за 4, 8 и 18 секунд соответственно.

В зависимости от ориентации треков на фотоснимках последний сканируется в од-

ном либо двух взаимно перпендикулярных направлениях. Необходимость сканирования в том или ином направлении определяется управляющей программой по математической маске события. Информация о направлении сканирования выдается на СА с командой "Настройка".

По окончании сканирования информация с фотоснимка подвергается анализу и предварительной обработке на машине "Минск-22". Программа проверяет качество измерения события на каждой из стереопрооекций, производит сглаживание треков и выброс "плохих" точек, находит, экстраполируя треки, координаты вершин события и точность их определения, приводит результаты измерений к стандартному виду для последующей обработки их на большой машине.

Время первичной обработки информации, относящейся к одной проекции трека, зависит как от длины трека, так и от числа "плохих" точек, измеренных в окрестности этого трека. Итеративный метод выброса "плохих" точек по методу наименьших квадратов оказался очень эффективным для вторичных следов событий. Такая очистка трека требует 2-6 секунд на машине класса "Минск-22" при общем числе точек на треке порядка 50. Программа выброса испытывалась на числовом материале, который поступал с полуавтомата ЛВЭ, работавшего в режиме имитации сканирующего автомата. Что касается координат следа пучка, то они обрабатываются после того, как найдена вершина события.

Чтобы просканировать 100-миллиметровый снимок в одном направлении, сканирующему автомату требуется около 10 секунд. Отсюда общее время, затрачиваемое на измерение, первичную обработку и запись на магнитную ленту, оказывается порядка полутора, двух и трех минут соответственно для трех-, пяти- и десятилучевых событий.

Эти оценки получены до составления рабочих программ и являются ориентировочными. Следует подчеркнуть, что алгоритмы программы, а следовательно, и временные оценки зависят от способа задания математической маски. При получении приведенных выше оценок предполагалось, что на просмотрно-измерительном столе измеряется с точностью 100-200 микрон по три точки на каждом треке события. Использовалось также предположение, что трек мало отличается от параболы, проведенной через соответствующие три точки маски, а точнее, отклонение от параболы не должно превышать полуширины коридора маски. При выбранной схеме измерения и отбора информации на входе сканирующего автомата этот коридор может быть достаточно широким (1 мм на снимке).

Если в процессе первичной обработки информации выясняется, что какой-либо трек выходит за пределы коридора маски, то с машины "Минск-22" в этом случае подается команда на повторное измерение фотоснимка. При повторном сканировании может быть использован более сложный алгоритм слежения за треком, использующий как ре-

зультаты предыдущего измерения, так и информацию, поступающую в процессе повторного сканирования.

С учетом перемеров и других эксплуатационных потерь времени можно полагать, что в среднем потребуется не более 5 минут на каждое событие. При 15-часовой ежедневной работе сканирующего автомата годовая производительность сканирующей системы окажется порядка 150-250 тысяч треков в год.

Замечания о методе сканирования снимка

Метод сканирования щелью снижает требования к техническим характеристикам ЭВМ, и в этом его преимущество, особенно при использовании малой вычислительной машины. Однако он обладает рядом недостатков, которые ограничивают его применимость для обработки некоторых типов событий.

Во-первых, при сканировании щелью точность измерения пробега частиц будет невелика. В частности, ошибка в измерении координат конца трека будет порядка 0,5 мм на фотоснимке. Поэтому в случае необходимости более точные измерения координат концов треков придется производить на просмотрно-измерительных столах.

Во-вторых, при сканировании щелью ошибки в измерении координат треков будут больше, нежели при сканировании "точкой". Они близки только в том случае, когда сканирующая щель параллельна измеряемому отрезку трека. При ограниченном наборе щелей с шагом по углу $\Delta\phi \geq 3^\circ$ такую параллельность обеспечить нельзя, и ошибки измерений должны возрасти. Это объясняется большей шириной сигнала, поступающего на вход СА при сканировании щелью, а также тем, что при отсутствии параллельности щели отрезку трека форма сигнала и смещение его центра относительно трека зависят от распределения пузырьков вдоль измеряемого отрезка трека. Для оценки этих ошибок может быть использована имеющаяся программа моделирования работы сканирующего автомата.

Наконец, рассматриваемый метод сканирования не предусматривает измерения такой характеристики трека, как плотность ионизации.

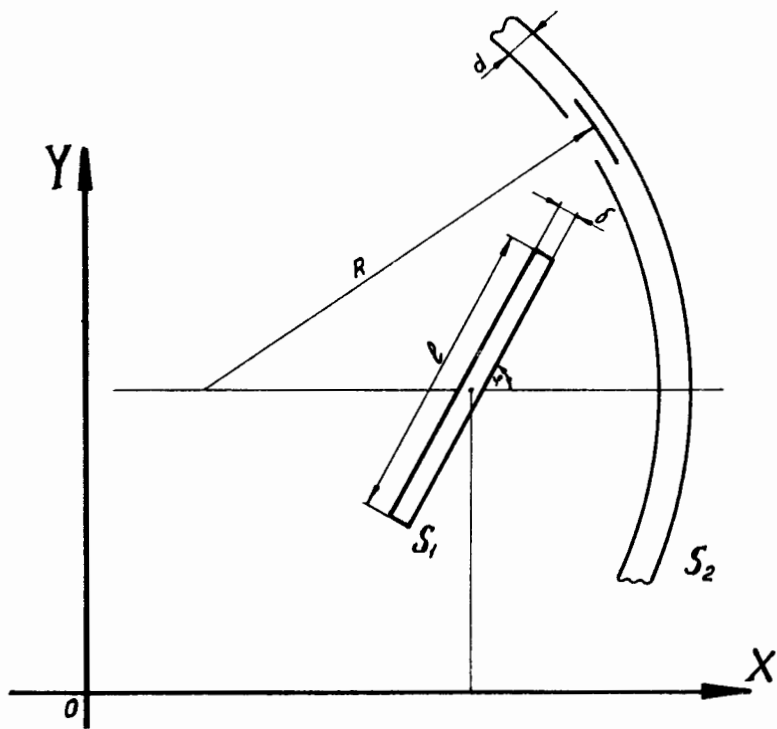
В более совершенных сканирующих автоматах, создаваемых на базе специальных электронно-лучевых трубок, сканирование световым штрихом (щелью) используется преимущественно в режиме просмотра фотоснимков.

Л и т е р а т у р а

1. P.V.C.Hough, B.W.Powell, A Method for Faster Analysis of Bubble Chamber Photographs, Proceedings of the International Conference on Instrumentation for High-Energy Physics, Berkely, 1960.
2. J.V.Frank, P.V.C.Hough, B.W.Powell, Realisation of HPD Systems at Three Laboratories, Nuclear Instruments and Methods, v. 20 (1963).
3. J.M.Burren, W.A.Woodley, The Use of a Flying Line for Automatic Scanning of Bubble Chamber Photographs, Nuclear Instruments and Methods, v.20 (1963).
4. G.R.Macleod, The Development of Data Analysis Systems for Bubble Chambers, for Spark Chambers and for Counter Experiments, Nuclear Instr. and Methods, v. v.20 (1963).
5. Proceedings of the Conference on Programming for HPD and other Flying Spot Devices, Paris, CERN 63-34, October 1963.
6. Proceedings of the Conference on Programming for Flying Spot Devices, Bologna, CERN 65-11, March 1965.
7. W.Humphry, PEPR-Programming Progress. Proceedings of the Conference on Programming for HPD and other Flying-Spot Devices, Paris, CERN 63-34, October 1963.

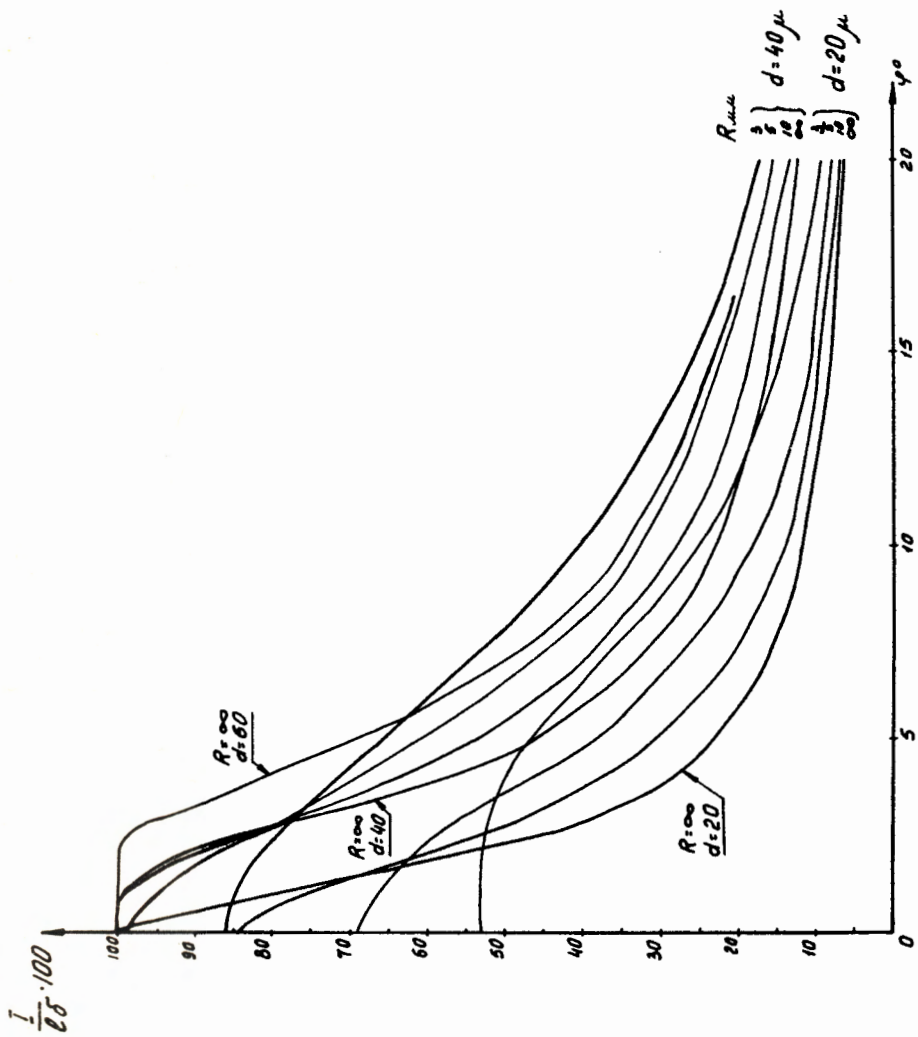
Рукопись поступила в издательский отдел

27 ноября 1965 г.



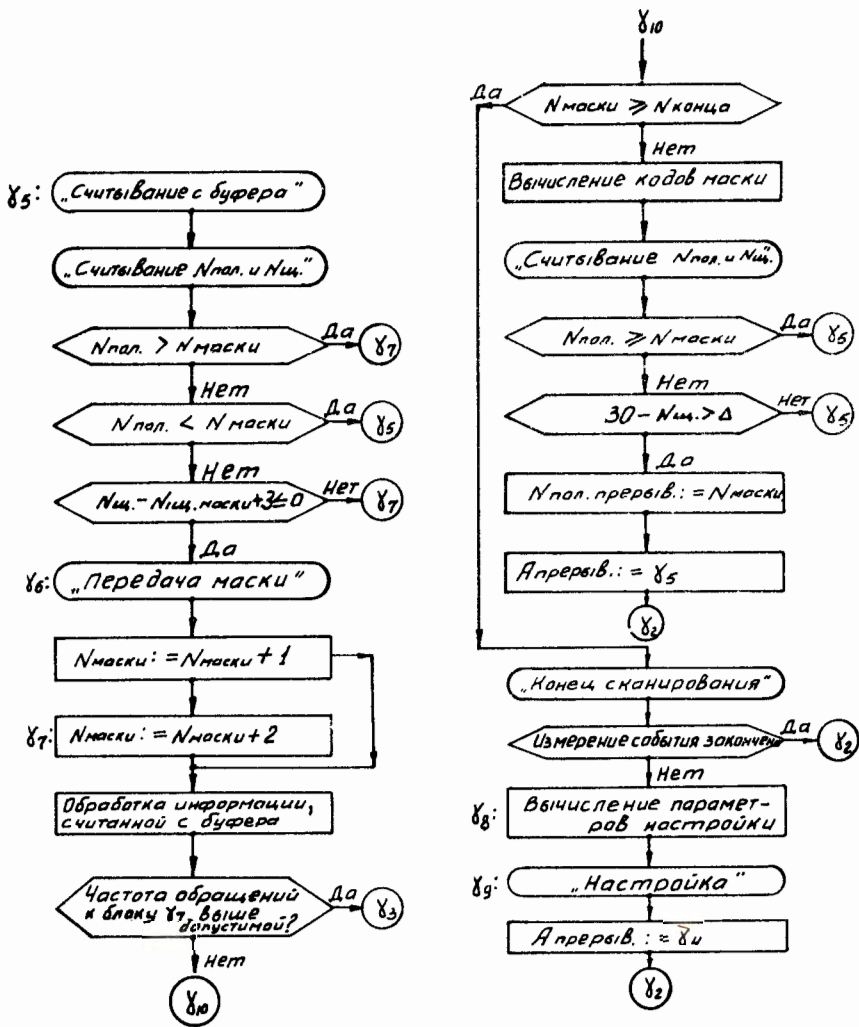
Р и с 1.

Схема сканирования. S_1 - шель, S_2 - трек.



Р и с 2.

Относительная амплитуда сигнала $i(t)$ как функция угла наклона щели φ для различных значений параметров R и d . Параметры щели: $l = 1000 \mu$, $\delta = 20 \mu$.



Р и с 3 а.

Блок-схема программы управления сканирующим автоматом (продолжение).