

СЗУУ.Зе

A-50

2/4-72

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

3331/2-72

13 - 6535



Ф.К.Алиев, З.Гузик, М.Турала

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ РЕШАЮЩИХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ОТБОРА СОБЫТИЙ РАССЕЯНИЯ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1972

13 - 6535

Ф.К.Алиев, З.Гузик, М.Турала

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ РЕШАЮЩИХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ОТБОРА СОБЫТИЙ РАССЕЯНИЯ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

При измерениях дифференциальных сечений элементарных частиц высоких энергий с ядрами мишени в области малых передач импульса при прохождении непроявившихся частиц пучка через всю установку обычно изучаются одотрековые события. Применяя для регистрации частиц годоскопические системы (пропорциональные камеры, сцинтилляционные годоскопы), получают информацию в двоичном коде /1/, которая очень удобна для цифровой обработки данных. Поскольку в таких экспериментах события рассеяния составляют доли процента от всех зарегистрированных событий, очень полезным оказывается предварительный отбор данных (подавление прямых прохождений частиц) /2,3,4,5/, существенный для ускорения набора статистики. Проблема эта особенно важна для опытов с применением искровых камер, у которых мертвое время составляет обычно несколько миллисекунд. Применение решающего устройства позволяет запускать искровые камеры /5/ только для регистрации полезных событий. Конечно, такое устройство должно обладать малым временем решения, так как время памяти искровых камер обычно порядка микросекунды.

В данной работе рассматриваются практические возможности реализации задачи отбора событий рассеяния и их качественный анализ.

## Постановка задачи

Для определения угла рассеяния частиц на ядрах мишени нужны по крайней мере три годоскопа для каждой плоскости ( $XZ$  и  $YZ$ ). Обычно применяют два годоскопа для определения угла входа первичной частицы в мишень и третий, фиксирующий угол рассеяния. Так как дальше информация обычно обрабатывается в двоичном коде, нужно, чтобы были выполнены условия на срабатывание одного и только одного детектора в каждом годоскопе. Рис. 1 показывает схему установки для определения угла рассеяния в одной плоскости, состоящую из трех годоскопов Г01, Г02 и Г03 с шагами сцинтилляторов, либо проволок в пропорциональной камере соответственно  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Величины  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  и  $\eta_3$  обозначают сдвиги годоскопов относительно условной оси, а  $L$  и  $M$  — базы установки. При срабатывании одного из детекторов в годоскопах координаты прохождения частиц относительно условной оси определяются соотношениями:

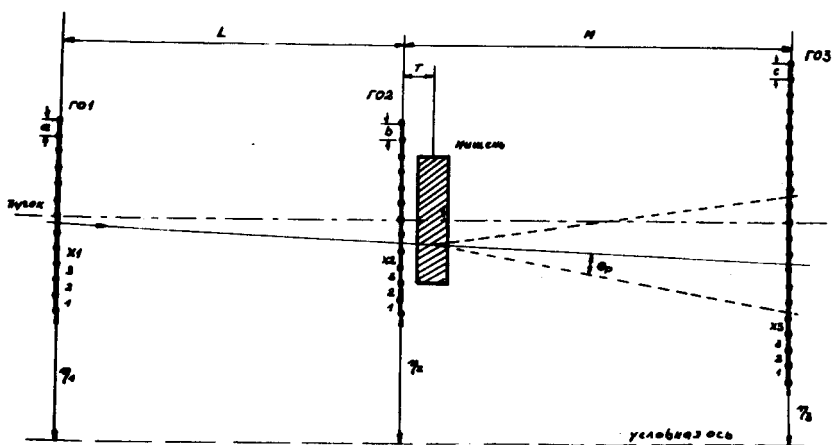


Рис. 1. Установка для определения угла рассеяния частиц.

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \eta_1 + ax_1 \\
 X_2 &= \eta_2 + bx_2 \\
 X_3 &= \eta_3 + bx_3 .
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Каждая координата в этом случае регистрируется со среднеквадратичной ошибкой, равной:

$$\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}} ,
 \tag{2}$$

где  $d$  - шаг годоскопа.

Угол входа частицы в мишень можно определить в виде:

$$\frac{X_2 - X_1}{L} = \Theta_1 ,
 \tag{3}$$

а угол выхода в виде:

$$\frac{X_3 - X_2}{M} = \Theta_2 .
 \tag{4}$$

Отсюда угол рассеяния находим по формуле

$$\Theta_p = \Theta_2 - \Theta_1 = \frac{X_3 - X_2}{M} - \frac{X_2 - X_1}{L} .
 \tag{5}$$

Угол принимает как положительное, так и отрицательное значение.

Условие на прямое прохождение ( $\Theta_p = 0$ ) можно записать в виде

$$M X_1 - (L + M) X_2 + L X_3 = 0 .
 \tag{6}$$

Кроме прямых, описанных уравнением (6), существуют еще прямые, которые выражение (6) вследствие дискретности установки не учитывает.

Рис. 2 показывает механизм появления таких траекторий. Величины  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$  описывают области Г01 и Г03, охваченные любыми прямыми, проведенными через один шаг Г01 и Г02, либо Г03 и Г02.

$$\gamma_1 = \frac{L}{M} (b + c) + b, \quad (7)$$

$$\gamma_3 = \frac{M}{L} (a + b) + b.$$

Величины:

$$k_1 = \frac{\gamma_1}{a}, \quad k_3 = \frac{\gamma_3}{c} \quad (8)$$

показывают, сколько детекторов годоскопа может сработать при прохождении нерассеивающейся частицы. Угловые ошибки, допускаемые применением алгоритма (6), равны:

$$\Delta\Theta_1 = (k_1 - 1) \frac{a}{L}, \quad \Delta\Theta_3 = (k_3 - 1) \frac{c}{M}. \quad (9)$$

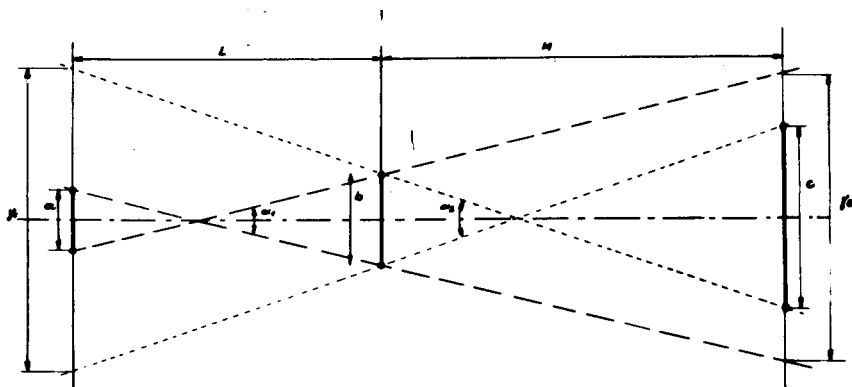


Рис. 2. Схема определения ошибки регистрации.

Полное уравнение, определяющее угол рассеяния, имеет вид:

$$\Theta_p M \cdot L = M a x_1 - (L + M) b x_2 + L c x_3 + L(\eta_3 - \eta_1) + M(\eta_1 - \eta_2) \quad (10)$$

или

$$Z_x = A x_1 - B x_2 + C x_3 - D, \quad (11)$$

где

$$A = M a, \quad B = (L + M) b, \quad C = L c, \quad (12)$$

$$D = L(\eta_1 - \eta_3) + M(\eta_2 - \eta_1), \quad Z_x = \Theta_p \cdot M \cdot L.$$

В дальнейшем анализе будем принимать знак, стоящий при  $D$ , за отрицательный, так как в реальных установках ГОЗ всегда имеет самое большое количества каналов ( $\eta_3 < \eta_1$ ).

При арифметической обработке экспериментальных данных числа ( $x_1, x_2, x_3$ ) поступают в решающее устройство в зашифрованном виде, а решение получается в виде величины  $Z_x$ , пропорциональной углу рассеяния. При практической реализации уравнения (11) не всегда удается подобрать коэффициенты  $A, B, C, D$  точно отвечающими реальным величинам, вытекающим из геометрии установки, что вносит дополнительную ошибку при вычислении угла рассеяния. При точном алгоритме отклонение от прямой на один шаг ГОЗ соответствует рассеянию на угол  $\frac{c}{M}$ , что дает отсчет  $Lc$  в уравнении (10) и, соответственно, отклонение на  $n$  шагов годоскопа свидетельствует о рассеянии на угол  $n \frac{c}{M}$  и дает отсчет  $nLc$ .

При нормировке уравнения (11) к простым числам коэффициентов (для простоты практической реализации) уравнение определяет число, которое находится в следующей зависимости от угла рассеяния:

$$\Theta_p = Z_x \cdot H, \quad (13)$$

где  $H$  - коэффициент нормализации.

Реализуя для обеих плоскостей алгоритм

$$\begin{aligned} Z_x &= |A'x_1 - B'x_2 + C'c_3 - D'| < S_x, \\ Z_y &= |A''y_1 - B''y_2 + C''y_3 - D''| < S_y, \end{aligned} \quad (14)$$

можно выделить все события, в которых рассеяние частиц произошло на угол больше заданного, т.е. отбросить прямые прохождения и исключить фон, создаваемый многократным рассеянием в мишени.

Алгоритм (14) вносит еще дополнительную ошибку за счет того, что не вырезает постоянный  $Z$ -пространственный угол.

Правильный алгоритм имеет вид:

$$\sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} < S_\pi, \quad (15)$$

однако эта формула очень неудобна для аппаратурной реализации.

Ошибки алгоритма, используемого для отбора событий рассеяния, связаны со следующими причинами:

- 1) неэффективностью установки;
- 2) координатной ошибкой места прохождения частицы и возникающей вследствие этого ошибкой при отборе прямых траекторий;
- 3) неоптимальностью размеров установки;
- 4) неточностью подбора коэффициентов  $A, B, C, D$ ;
- 5) размерами (неточностью) и местом расположения мишени;
- 6) многократным рассеянием.

#### Анализ эффективности отбора событий

Для исследования качественных возможностей отбора событий рассеяния были проведены расчеты по методу Монте-Карло на ЭВМ БЭСМ-6.



Рассматривались гипотетическая установка со стопроцентной эффективностью и гипотетический пучок заряженных частиц. Установка была выбрана из трех годоскопов с 16 детекторами в Г01 и Г02 и 32 детекторами в Г03 (обозначение см. на рис. 1). Пучок описывался распределениями:

$$\sigma_x = n_1 a \quad \text{и} \quad \sigma_\pi = n_2 \frac{a}{L + M},$$

где  $\sigma_x$  – распределение пучка в первом годоскопе,  $\sigma_\pi$  – угловое распределение пучка. Расчеты были разбиты на две группы:

а) исследование поведения величины  $Z_x$  в уравнении (11) для нерассеявшихся частиц в одной плоскости при разных параметрах пучка и установки;

б) исследование кривой обрезания для события рассеяния.

Центр пучка находился на оси симметрии установки. Для каждой угловой точки разыгрывалось 1000 событий.

	1			2			3			4								5							
	а	б	в	а	б	в	а	б	в	а	б	в	г	д	е	ж	з	а	б	в	г	д	е	ж	з
$a[m]$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$b[m]$	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$c[m]$	.	.	.	.	.	.	2	4	6	8	.	.	.	4	4	4	4	.	.	.	.	.	.	.	.
$L[m]$	20	40	60	20	20	20	20	20	20	20	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{6}$	20	20	20	20	20	20	20	20
$M[m]$	20	40	60	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
$n_1$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$n_2$	1	1	1	4	2	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
зам.										$L \cdot M = const = 40m$								$40$							

Рис. 3. Таблица параметров измерений  $Z_x$  без рассеяния.

В группе а) исследования велись для изучения возможности выделения прямой. Условия измерений даны в таблице на рис. 3.

1.  $Z_x = f\left(\frac{a}{L}\right)$ ,  $L = M$  и  $a = b = c$ . При постоянных параметрах пучка для разных  $\frac{a}{L}$  прямые регистрируются с постоянной ошибкой, чего и следовало ожидать из соотношений (7).

2.  $Z_x = f(\sigma_\pi)$ . Для данной геометрии установки  $K_1 = 3$ , что показано на гистограммах (рис. 4). При  $n_2 < 1$  ошибка выделения прямой небольшая и зависит от  $\frac{a}{\sigma_\pi}$ ; если пространственное распределение пучка сравнимо или больше размеров детекторов (реальные экспериментальные условия), отбор прямых происходит с  $\sim 50\%$  ошибкой (рис. 4).

3.  $Z_x = f\left(\frac{c}{a}\right)$ , при  $a = b$ . Средняя угловая ошибка растет с увеличением шага детекторов в одном из годоскопов (обычно Г03), так как область захвата детекторов прямыми, не выполняющими условий алгоритма, растет.

Теоретические вычисления (10) и (13) совпадают с результатами расчетов (рис. 5). Из гистограмм видно постоянное статистическое смещение центра функции  $Z_x$ . Оно возникает за счет того, что каждому регистрируемому прохождению приписывается координата середины сработавшего детектора. Из (5) можно вывести, что среднее смещение равно  $\Delta\Theta_D = \frac{c - a}{2L}$ , откуда  $\Delta D = \frac{\Delta\Theta_D}{H}$ . В описываемых расчетах уравнение (11) было нормировано всегда к  $B = 1$ . Из (10) получается коэффициент нормализации  $H = b \frac{M+L}{ML}$ , который для данной группы расчетов равен 0,2 мрад.

4.  $Z_x = f\left(\frac{L}{M}\right)$ , при  $a = b = c$  и  $a = b$ ,  $c = 2a$ .

На рис. 6 представлены результаты исследований  $\Delta\Theta \sim Z_x$  для разных отношений  $\frac{L}{M}$  при постоянном  $L + M$ . Из кривых видна сильная зависимость ошибки измерений от соотношений баз установки.

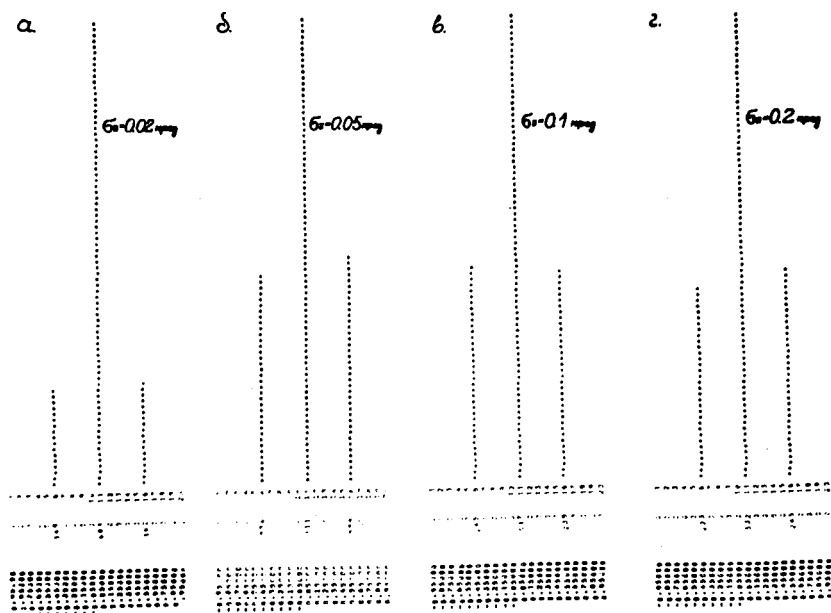


Рис. 4. Гистограммы измерений  $Z_x$  в функции  $\sigma_\pi$ .

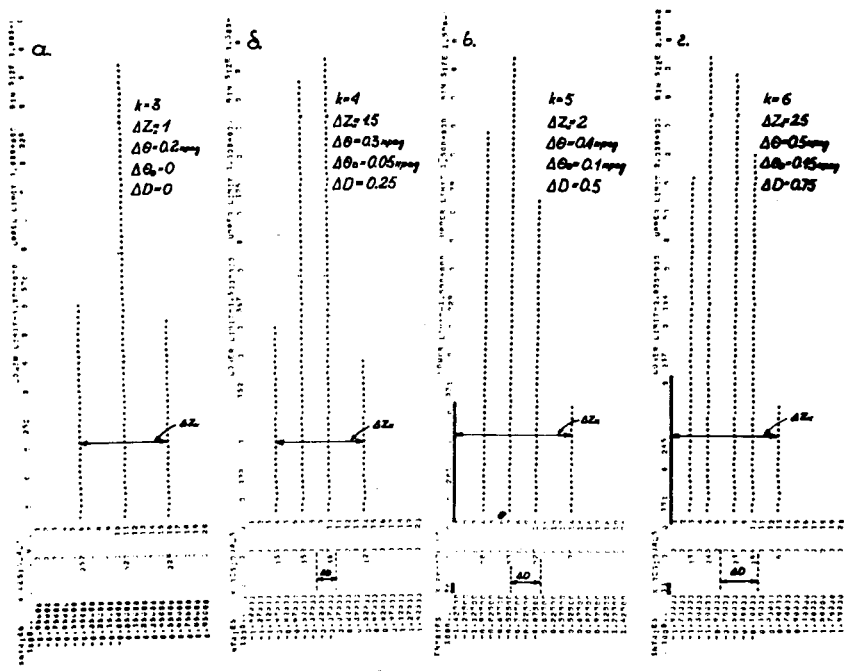


Рис. 5. Гистограммы измерений  $Z_x$  в функции  $\frac{c}{a}$ .

Оптимальное соотношение  $\frac{L}{M}$  при любых  $a$ ,  $b$ ,  $c$  выводится по критерию равенства углов  $a_1$  и  $a_2$  (рис. 2).

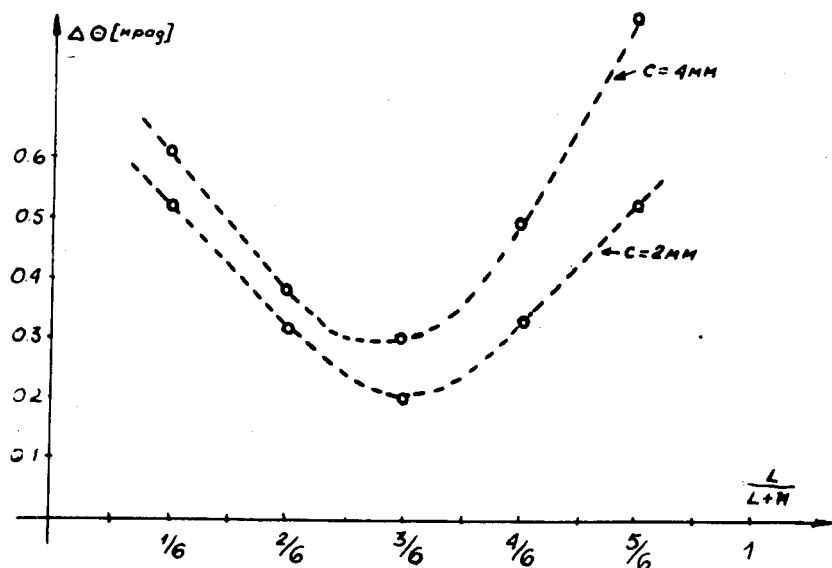


Рис. 6. Зависимость  $Z_x$  от соотношения  $\frac{L}{M}$ .

$$a_1 = \frac{b}{\frac{b}{a+b} L}, \quad (16)$$

$$a_2 = \frac{b}{\frac{b}{c+b} M}.$$

Для  $a_1 = a_2$  оптимальное условие на минимум ошибки есть

$$\frac{L}{M} = \frac{a+b}{c+b}, \quad (17)$$

при  $a = b = c$  минимум ошибки будет для  $\frac{L}{M} = 0,5$ , а при  $a = b$ ,  $c = 2a$  для  $\frac{L}{M} = 0,66$ , что показано на рис. 6.

5.  $Z_x = f(\Delta B)$ , применяемый алгоритм всегда отличается от реального, описываемого установкой.

Исследования зависимости  $Z_x$  от неточности коэффициента показали, что переменная  $\Delta \Theta$  растет пропорционально  $\Delta B$  (рис.7а), пропорционально  $\Delta B$  растет также смещение центра  $\Delta D$  (рис.7б).

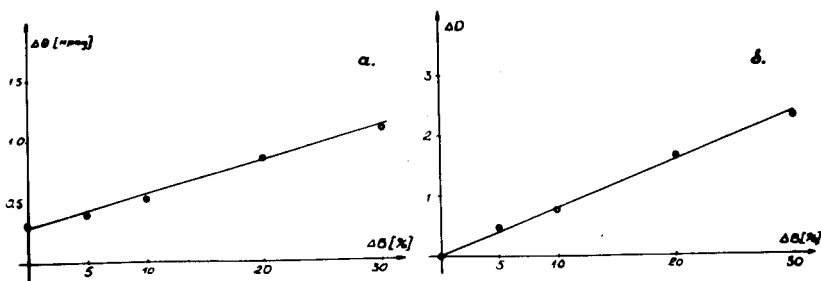


Рис. 7. Зависимости  $\Delta \Theta$  и  $\Delta D$  от неточности коэффициента  $B$ .

При определении возможности выделения рассеянных событий с помощью алгоритма (14) условия измерений остались такими же, как и прежде ( $L = M = 20$ ,  $a = b = c = 2$  мм,  $\sigma_a = 8$  мм,  $\sigma_\pi = 0,05$  мрад). Начало мишени (длина 0,5 м) находилось в середине Г02. Были заданы три угла обрезания 0,2; 0,6 и 1 мрад. Из гистограмм (рис. 8а,б,в) видно, что события рассеяния на угол меньше заданного отбрасываются, причем ошибка обрезания равняется 0,2 мрад, что показывает рассмотренный раньше (рис. 5а) случай. На рис. 9(а,б) можно видеть различия между кривыми пространственного обрезания при применении алгоритмов (15) и (14). Правильный алгоритм (15) сохраняет угловую ошибку 0,2 мрад, полученную для одной плоскости (рис. 8). Обрезание неравно-

мерным пространственным углом (14) увеличивает эту ошибку до 0,35 мрад. Гистограмма 9 в была снята при эффективности ГОЗ равной 98%. Появление неотбранных прохождений связано с тем, что при несрабатывании какого-либо детектора в ГОЗ алгоритм оценивает данное событие как рассеянное и не отбрасывает его.

### Реализация алгоритма

Практическое решение уравнений (14) для одной плоскости должно выполнять следующие функции:

1.  $A \cdot x_1 = \phi_1$ ,
2.  $B \cdot x_2 = \phi_2$ ,
3.  $C \cdot x_3 = \phi_3$ ,
4.  $\phi_1 + \phi_3 = \phi_4$ ,
5.  $\phi_2 + D$ ,
6.  $|\phi_4 - \phi_5| = \phi_6$ ,
7.  $\phi_6 < S_x = \phi_7$ ;  $\phi_7 = 1$ , когда  $\phi_6 < S_x$   
 $\phi_7 = 0$ , когда  $\phi_6 \geq S_x$ .

Реализуя эту программу для обеих плоскостей, можно выделить желаемый пространственный угол обрезания. Приписывая выполнению неравенств (14) логическую единицу, общее решение получим как совпадения решений в обеих плоскостях (рассеяние хотя бы в одной плоскости свидетельствует о полезном событии).

Функциональная схема решающего устройства представлена на рис. 10. Информация с шифраторов данных поступает в виде бинарных слов шириной  $N^i$ . Операции умножения реализуют обычно при помощи конкретных для данной установки /2,3,4/ схем согласно алгоритму (10). Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  сводятся до простых чисел (1, 2, 4), что на практике выполняется сдвигом всех разрядов в сторону старших битов.

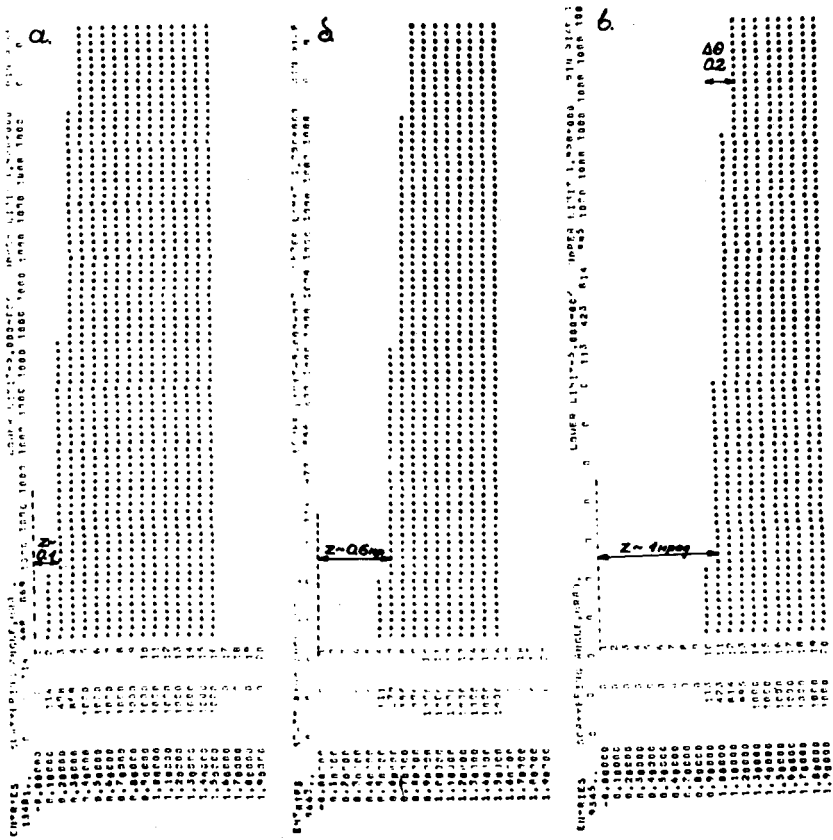


Рис. 8. Гистограммы кривой обрезания рассеянных событий.



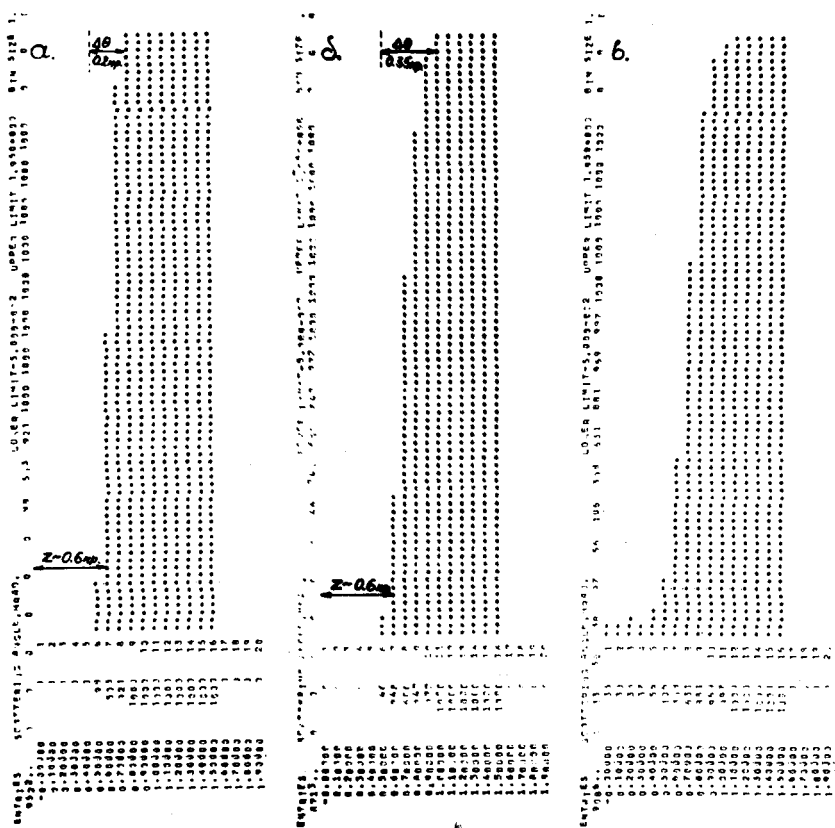


Рис. 9. Гистограммы кривой обрезания для алгоритмов (15)<sub>а</sub>, (14)<sub>б</sub> и при неэффективности установки *b*.

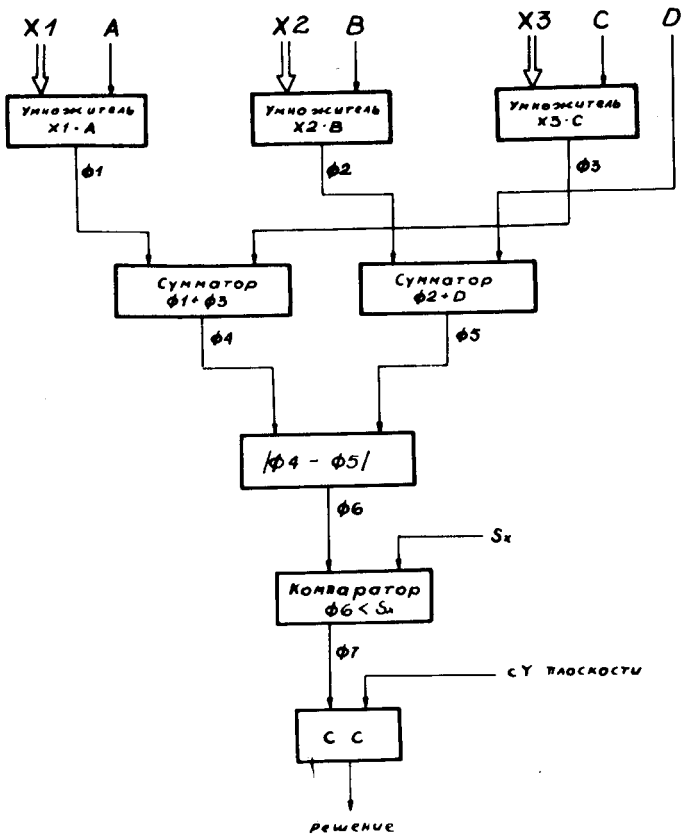


Рис. 10. Функциональная схема решающего устройства.

Коэффициент 3 требует уже дополнительного сумматора. Ниже будет рассматриваться универсализация процессов умножения для применимости устройства к любым экспериментальным установкам.

Функции  $\phi 4$  и  $\phi 5$  реализуют при помощи полусумматоров и полных сумматоров, составленных либо из обычных микросхем типа "И-НЕ" /3/, либо из микросхем со средней степенью интеграции /6/.

Функцию  $\phi 6$  (определение модуля разности) можно выполнить двумя методами. Первый заключается в том, что строятся две схемы вычитания с полным форматом слова. На соответствующие входы схем вычитания уменьшаемое и вычитаемое поданы в переставленном порядке. Выходы схем пропущены через ворота, открываемые переносом из последней позиции схемы вычитания, в которой уменьшаемое меньше вычитаемого, а затем суммированы. Второй метод использует только одну  $N$  разрядную схему вычитания. Если уменьшаемое больше вычитаемого, результат получается в прямом коде, а если уменьшаемое меньше вычитаемого (о чем свидетельствует перенос из последнего разряда), результат получится в дополнительном коде: число это надо затем перевести в прямой код. Существует простой практический способ перевода дополнительного в прямой код: биты данного числа надо рассматривать по очереди, начиная с самого младшего; нули и первая найденная единица переписываются без изменений, а все следующие биты с отрицанием.

Функцию  $\phi 7$  реализуют цифровым компаратором. Оптимальная по числу используемых компонентов схема компаратора приведена в работе /3/.

### Универсальная операция умножения

Универсализацию алгоритма (применимость к любым экспериментальным установкам) можно осуществить набором коэффициентов, через

которые умножаются поступающие числа номеров сработавших детекторов, согласно алгоритму отбора.

Реальные коэффициенты (  $A_p$  ,  $B_p$  ,  $C_p$  ) (12) могут принимать любые значения с определенного диапазона и чем набор постоянных коэффициентов устройства больше и равномернее, тем лучше можно приблизиться к реальным условиям.

Если  $U$  - количество коэффициентов, которое можно реализовать при помощи данного схемного решения, и каждый коэффициент набирается отдельно, то общее количество комбинаций чисел  $A$  ,  $B$  ,  $C$  является сочетанием  $U$  по 2.

$$z = \frac{u!}{2!(u-2)!} + 1. \quad (18)$$

Рис. 11 показывает практическую реализацию определенного набора коэффициентов, а рис. 12 - размещение их значений, если нормировка делается по отношению к самому большому коэффициенту.  $\Delta_{max}$  обозначает максимально возможное отклонение коэффициента приближенного от реального. Оптимальным по количеству компонентов и точности кажется решение  $D$  , которое требует только одного сумматора. Для этого решения, подготовлена на языке Фортран программа для поиска оптимальных  $A$  ,  $B$  ,  $C$  по критерию

$$\left(\frac{A - A}{A}\right)^2 + \left(\frac{B - B}{B}\right)^2 + \left(\frac{C - C}{C}\right)^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

Программа эта приводится ниже.

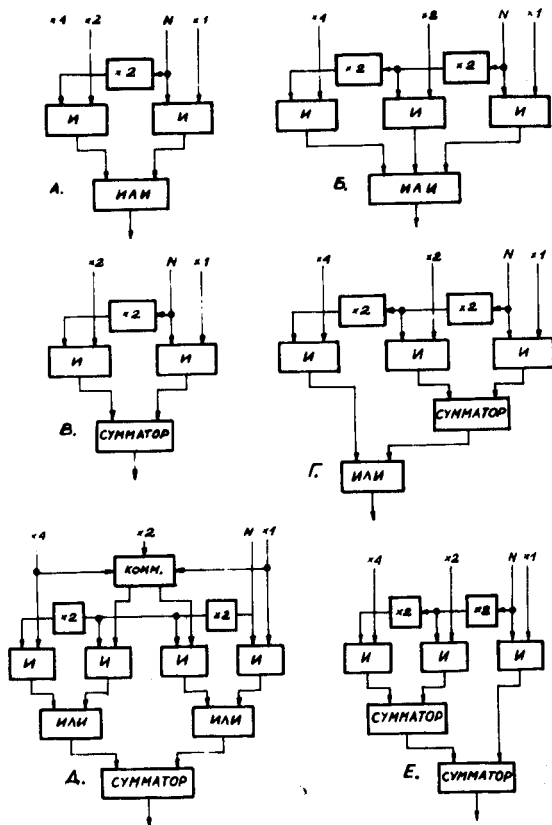


Рис. 11. Реализация коэффициентов А, В и С.

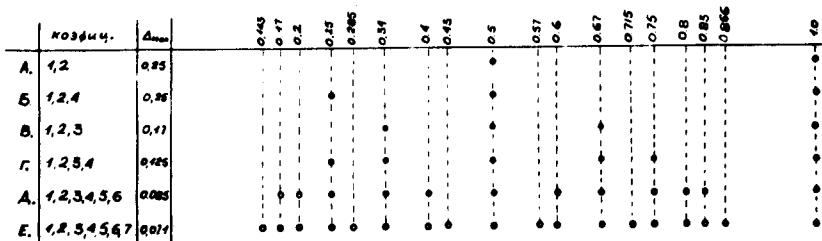


Рис. 12. Размещение значений коэффициентов для разных схемных решений.

```

PROGRAM DIANA
DATA (A ), (B ), (C )
FO 1000000.
DO 10 I 1,6
DO 10 J 1,6
DO 10 K 1,6
XI FLOAT(I)
XJ FLOAT(J)
XK FLOAT(K)
F ((XI - A)/A)** 2 ((XJ-B)/B) ** 2 ((XK-C)/C)**2
IF (F - FO) 5, 10, 10
5 FO F
IO J
KO K
10 CONTINUE
PRINT 11, A,B,C
11 FORMAT (///5X, 17H REAL COEFFICIENTS, BX,3(2X,F8,4))
PRINT 12, 10, JO, KO
12 FORMAT (5X, 25H APPROXIMATED COEFFICIENTS, 3(2X,18))
STOP
END

```

В заключение авторы выражают благодарность Э.Н. Цыганову за интерес к работе и ценные советы.

#### Литература

1. З. Гузик и др. Препринт ОИЯИ, 13-6317, Дубна, 1972.
2. L.J.Koester et al. ISPR Conf. Nucl. Electron, 1969.
3. Ф.К. Алиев и др. Препринт ОИЯИ, 13-6065, Дубна, 1971.
4. A.A. Derevshchikov et al. Fast Digital Processor for Application in High Energy Physical Experiments, Nucl.Instr. & Meth., (in print).
5. Z. Guzik et al. JINR Preprint E13-6194, 1971.
6. Microelectronic Data Book, Motorola Semiconductor Products Inc.
7. J. Flores. The Logic of Computer Arithmetic, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 июня 1972 года.