

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10512

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

10 - 10512

С.Г.Басиладзе

ОБ ОБЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОТБОРА СОБЫТИЙ

1977

10 - 10512

С.Г.Басиладзе

ОБ ОБЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОТБОРА СОБЫТИЙ

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

Басиладзе С.Г.

10 - 10512

Об общих характеристиках электронных систем отбора событий

В работе определен коэффициент отбора, характеризующий системы запуска электронных экспериментальных установок. Количественно проанализированы факторы, снижающие его величину в реальных системах. Приводятся обобщенные характеристики многократных устройств совпадений, обеспечивающих первоначальный отбор событий. Выведены соотношения, связывающие быстродействие и количество интегральных схем в преобразователях кодов быстродействующих процессоров вторичного отбора событий.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Электронные методы в отличие от других способов регистрации ядерных излучений позволяют исследовать очень редкие процессы. При интенсивности исходного пучка частиц до $10^6 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$ электронная установка способна выделять события, происходящие раз в несколько минут и реже. Коэффициент отбора, следовательно, может достигать величин $10^8 \div 10^{10}$.

Если каждый датчик детекторов* установки работает по принципу "да-нет" /минимальное количество информации/ и общее число датчиков равно m , то количество информации о событии равно $m \text{ бит}$. Этот набор обеспечивает 2^m возможных комбинаций сигналов. Следовательно, для получения коэффициента отбора $K_{\text{отб}}$ необходимо

$$m = \log_2 K_{\text{отб}} \quad /1/$$

датчиков, в том случае когда каждая комбинация сигналов является значащей. Для указанного выше коэффициента отбора требуется, как видим, 30÷40 датчиков. Такое количество необходимо лишь в случае равномерного распределения интенсивностей различных комбинаций входных сигналов. Реально всегда исследуют события более редкие, чем сопровождающие их фоновые процессы больших интенсивностей. Если интенсивность фоновых событий превосходит искомую, например, в $1000 / 2^{10} /$ раз, то необходимо лишь 20÷30 датчиков

* Датчиком считается источник сигналов, например, проволока пропорциональной камеры или анод ФЭУ.

для получения того же коэффициента отбора. В реальных же установках количество датчиков, осуществляющих отбор событий и запуск систем измерения их параметров, существенно больше и может достигать сотен и даже тысяч. Для выяснения природы данного противоречия рассмотрим работу электронных систем отбора более подробно.

Как известно, измерения и отбор событий производят обычно по времени, координате /углу/ и энергии. Каждый из этих параметров физически есть непрерывная величина /в общем виде обозначим ее A /, интересующая экспериментатора в некоторых пределах: от $A_{\text{мин}}$ до $A_{\text{макс}}$. В задачах измерений данный диапазон квантуется, с учетом требований по точности, на участки ΔA , образуя набор дискретных значений параметра с числом градаций $D_A = (A_{\text{макс}} - A_{\text{мин}}) / \Delta A$. Следовательно, информация, получаемая с датчиков, представляется в линейном позиционном коде, причем величина параметра задается номером соответствующей ячейки квантования. При таком способе съема количество разрядов для хранения числа равно D_A , для него характерна большая избыточность по сравнению с представлением в двоичном коде:

$$K_{\text{избыт.}} = D_A / \log_2 (1 + D_A) \quad /2/$$

В связи с этим предпринимаются попытки /1/ перевода информации в двоичный код в самом детекторе. Однако такое кодирование не применимо в случае многократных срабатываний* в одном акте измерений /в координатных и временных детекторах/. К настоящему времени не создано быстродействующих схем, работающих с кодами, которые позволяют фиксировать многократные срабатывания при малой степени избыточности. Поэтому перевод из линейного кода в двоичный ведется по очереди для каждой сработавшей ячейки. На преоб-

*Регистрации нескольких частиц.

разование кодов необходимо затратить какое-то время, иногда довольно значительное.

В задачах отбора применяют варианты разбиения параметров на различное число интервалов. Целесообразно рассмотреть сначала простейший случай, когда параметры разбиваются на минимальное число интервалов, т.е. на два. Один интервал включает в себе искомого события ($D=1$), а оставшийся - только фоновые процессы. Таким образом, в многомерном пространстве параметров выделяется объем, содержащий в себе искомого события. Как легко видеть из /2/, в этом случае код поступающей информации не содержит избыточности* и требуемые логические операции для выделения искомого события минимальны:

$$\text{Выбор} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_m \quad /3/$$

т.е. необходима только операция "И" /выделение совпадения/. В выражение /3/ может входить прямое либо инверсное значение параметра /антисовпадения/.

Распределение интенсивностей по каждому из параметров задается конкретными условиями эксперимента. Рассмотрим для примера условную схему эксперимента, показанную на рис. 1а. На первом этапе "одноуровневого" отбора событие считается искомым, если частица пучка, попав на мишень ($S=1$), отклонилась ($A=0$) в заданный диапазон углов ($\theta=1$) и выделила в спектрометре энергию в интересующем нас диапазоне ($E=1$). Эксперимент проводится в условиях некоторого фона частиц в каждом из детекторов /показан стрелками/.

Представим возможные комбинации срабатываний датчиков в виде линейной развертки /рис. 1б/, где номер ячейки равен величине числа $SA\theta E$ /в двоичном коде/. Распределение интенсивностей (N_j), задаваемое условиями эксперимента, построено над соответствующими ячейками в виде заштрихованных прямоугольников. Для идеальной схемы отбора

* При $D=1$ линейный код совпадает с двоичным.

$$K_{\text{отб.}}^{\text{ид.}} = \frac{\sum_{j=1}^{2^m-1} N_j}{N_c}, \quad /4/$$

т.е. коэффициент отбора численно равен отношению полного количества комбинаций сигналов, поступивших с детекторов установки /в единицу времени/, к числу содержащихся в них искомым событиям N_c . Реальные системы отбора имеют ограниченную величину быстродействия /мертвое время - t_M / и разрешающего времени - τ , в силу чего практически достижимый коэффициент отбора меньше, чем следует из даваемого /4/.

Мертвое время /будем считать его непродлевающимся/ ведет к появлению просчетов в каждом из каналов выделения. В результате истинные комбинации в каждом из каналов попадают в каналы слева, отстоящие от истинного на $2^{(i-1)}$ ячеек, где i - номер датчика, электроника которого допустила просчет. Так например, просчеты одиночных срабатываний детекторов на рис. 1б приведут к сдвигам S - на 1, A - на 2, θ - на 4, E - на 8 ячеек влево, т.е. попадут в нулевую ячейку. Таким образом, распределение срабатываний реальной электроники будет отличаться от исходного распределения сигналов. С точки зрения коэффициента отбора нас интересует не полное перераспределение интенсивностей, а лишь просчеты в селектируемом канале, вызванные неэффективностью электроники датчиков, включенных на совпадения, и присчеты в этом же канале, вызванные неэффективностью электроники датчиков, включенных на антисовпадения. Присчеты будут возникать в каналах, расположенных справа от выделяемого и отстоящих от него на $2^{(a-1)}$ ячеек, где a - номера датчиков, включенных на антисовпадения.

Суммарная загрузка каждого датчика равна:

$$N_i = \sum_{j=1}^{2^m-1} N_j, \quad /5/$$

где индекс "1" означает, что суммирование идет по каналам, в которых данный датчик срабатывает /например,

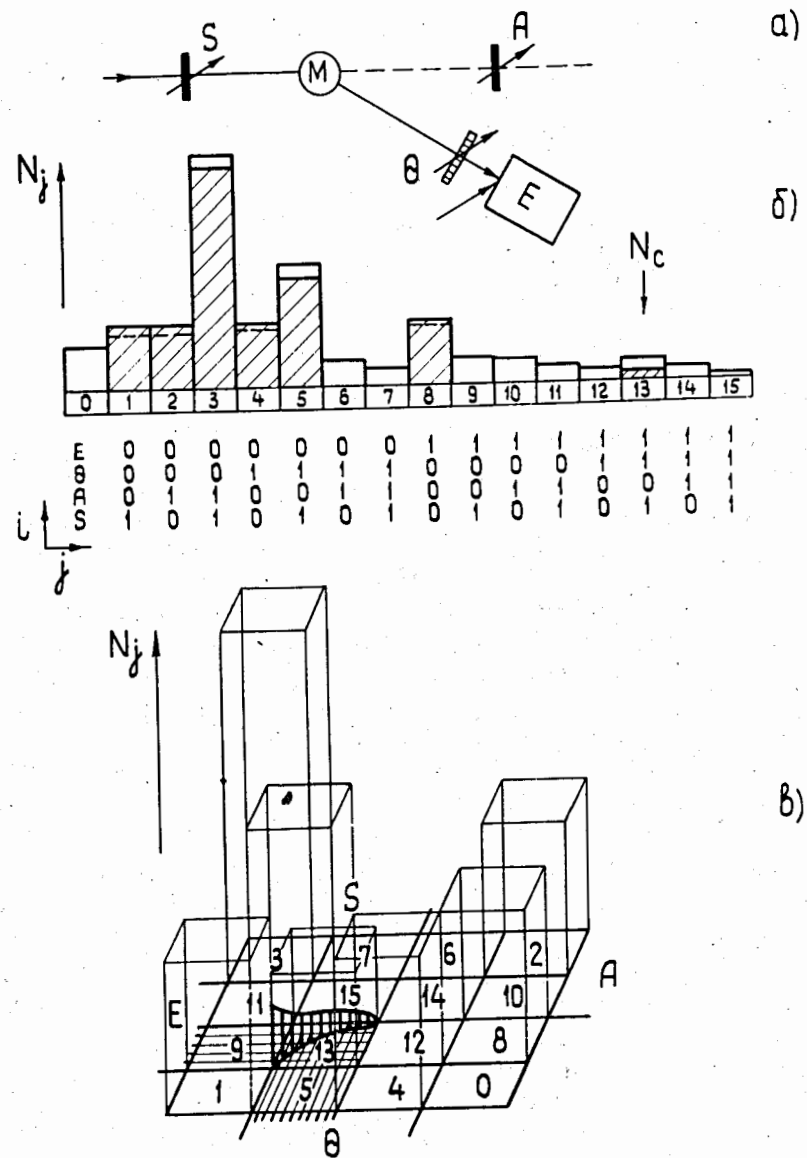


Схема условного эксперимента по исследованию рассеяния частиц /а/; распределение интенсивностей различных комбинаций сигналов в линейной развертке /б/ и в развертке на плоскости /в/.

для детектора S - нечетные каналы, *рис. 16*/. Просчеты, вызванные неэффективностью электроники датчиков, будут равны сумме попаданий селективируемой комбинации сигналов на результирующее мертвое время, образованное мертвыми временами электроники каждого из датчиков. Другими словами, сосчитанное количество искомых комбинаций будет пропорционально "живому времени" системы отбора. Доля мертвого времени электроники одного из датчиков в единичном временном интервале $\tau/2$ составит:

$$\bar{t}_{Mi} = \frac{N_i \cdot t_{Mi}}{1 + N_i \cdot t_{Mi}} \quad /6/$$

Среднее "живое время" системы отбора будет равно

$$t_{отб} = \prod_{i=1}^m (1 - \bar{t}_{Mi}), \quad /7/$$

здесь индекс "с" у \bar{t}_{Mi} означает, что в произведение входят только удельные мертвые времена датчиков совпадений /срабатывающих в селективируемой комбинации/.

Присчеты, вызванные мертвым временем датчика "а", составляют: $t_{ма} \cdot N_{[c+2^{(a-1)}]}$, откуда общее количество присчетов в селективируемом канале

$$\Delta N'_c = \sum_{i=1}^m t_{Mi}^{-a} \cdot N_{[c+2^{(i-1)}]} \quad /8/$$

Здесь индекс "а" означает, что суммирование производится только по датчикам, дающим "нули" в искомую комбинацию сигналов.

Конечность величины разрешающего времени ведет к появлению случайных совпадений /они вместе с просчетами, вызванными t_M , показаны незаштрихованными участками на диаграмме *рис. 16*/. С точки зрения величины коэффициента отбора губительным является появление присчетов в селективируемом канале, вызванных случайными и истинно-случайными совпадениями, имитирующими искомое событие:

$$\Delta N''_c = \left[\prod_{j=1,2,4,\dots}^{2^{m-1}} (N_j \cdot \tau_j) \right] \cdot \sum_{j=1,2,4,\dots}^{2^{m-1}} \frac{1}{\tau_j} + \sum_{j=1}^{c-1} N_j \cdot N_{c-j} \cdot \tau_j \quad /9/$$

Здесь первое слагаемое есть интенсивность случайных совпадений от одиночных срабатываний датчиков, а второе - интенсивность истинно-случайных совпадений / N_j либо N_{c-j} должны быть истинными совпадениями/. Величина τ_j равна: а/ нулю, если в числах "j" или "(с - j)" имеются общие двоичные разряды, содержащие "1" /понятие совпадений не имеет смысла, см. *рис. 16*;/ б/ $\tau_{мин}$ - минимальному из разрешающих времен электроники датчиков, включенных в канале "j" на совпадения, если совпадения в этом канале истинные;

в/ $\left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\tau_i} \right)^{-1} \right]$, если совпадения в канале "j" случайные; г/ $t_{вых}$, если в канале "j" включена промежуточная схема совпадений, формирующая выходной сигнал по длительности.

Коэффициент отбора снижают также просчеты в селективируемом канале, вызванные конечностью разрешающего времени электроники датчиков, включенных на антисовпадения. Как легко видеть из *рис. 16*, эти просчеты попадают в каналы, лежащие справа от выделяемого, т.е.

$$\Delta N'''_c = - \sum_{j=c+1}^{2^m-1} N_c \cdot N_{j-c} \cdot (\tau_c + \tau_{j-c}), \quad /10/$$

здесь $(\tau_c + \tau_{j-c}) = 0$, если в числе "j - с" имеются нули в тех разрядах, где в числе "с" содержатся единицы.

С учетом /7/ ÷ /10/ получим:

$$K_{отб} = \frac{\left\{ \prod_{i=1}^m (1 - \bar{t}_{Mi}^{-c}) \right\}}{\left\{ 1 + \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^m t_{Mi}^{-a} \cdot N_{[c+2^{(i-1)}]} \right\}} \times \frac{\left\{ 1 - \sum_{j=c+1}^{2^m-1} N_{j-c} \cdot (\tau_c + \tau_{j-c}) \right\}}{\left\{ 1 + \frac{1}{N_c} \left[\prod_{j=1,2,4,\dots}^{2^{m-1}} (N_j \cdot \tau_j) \right] \cdot \sum_{j=1,2,4,\dots}^{2^{m-1}} \left(\frac{1}{\tau_j} \right) + \sum_{j=1}^{c-1} N_j \cdot N_{c-j} \cdot \tau_j \right\}} \quad /11/$$

Формула /11/ учитывает как влияние просчетов, так и влияние присчетов. Между просчетами и присчетами имеется, однако, принципиальная разница в том отношении, что во многих установках просчеты допустимы, т.к. ведут лишь к относительному замедлению скорости набора "статистики", присчеты же требуют дополнительных мер для их последующего отделения от искомым событий. Ликвидация присчетов на аппаратурном уровне требует включения дополнительных датчиков.

Для нашего примера, если $N_1 = N_2 = N_4 = N_8 = 10^3 \text{ с}^{-1}$, $N_3 = 10^7 \text{ с}^{-1}$, $N_5 = 10^4 \text{ с}^{-1}$, $N_{13} = 1 \text{ с}^{-1}$, $\tau = 5.10^{-9} \text{ с}$, $t = 20 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, получим $K_{\text{отб}} / K_{\text{отб}}^{\text{ид}} = 0,75$, причем 17%-ное понижение коэффициента отбора дадут просчеты в каналах совпадений за счет мертвого времени, а 10%-ное понижение - присчеты из-за случайных совпадений.

Из рассмотренного выше вытекает следующее:

1. В каждом конкретном случае число значащих комбинаций сигналов невелико по сравнению со всеми возможными, поскольку полный набор комбинаций охватывает все возможности постановок экспериментов с данным числом датчиков.

2. При идеальной электронике отбора существуют только значащие комбинации сигналов, поступающие с физической установки. В реальной электронике отбора появляются ложные комбинации сигналов практически во всех каналах, в этом смысле реальная электроника "отрабатывает" всегда полный набор комбинаций сигналов.

3. Для обеспечений максимальной производительности системы и повышения коэффициента отбора мертвое время электроники каждого датчика должно выбираться в зависимости от интенсивности его срабатываний и быть минимальным для датчика с наибольшей интенсивностью. Системы отбора с предварительным запоминанием исходной информации и последующей логической обработкой события^{/3/} менее эффективны для отбора 1-го уровня, т.к. в них мертвое время для всех датчиков одинаково и равно максимальному.

4. Учитывая допустимость снижения требований к быстродействию и временному разрешению электроники датчиков, работающих с малыми нагрузками, целесообразно использовать для них сравнительно медленную электронику, что позволит достичь существенной экономии мощности, потребляемой электроникой отбора.

В современных системах отбора, как уже говорилось, применяют устройства с разбиением параметров не на два интервала, а на большее их количество. Простейшим примером таких устройств являются мажоритарные схемы совпадений, а более сложные получили название быстрых процессоров^{/4/}. Реально распределение искомым событий не занимает никогда полностью "прямоугольного" объема в многомерном пространстве параметров. Чаще всего оно располагается на некоторой "поверхности" или "линии", т.е. ряд параметров искомого события функционально связан уравнением этой поверхности или линии. Например, в нашем условном эксперименте может быть обратная зависимость между углом отклонения и энергией частиц /рис. 1а/. На рис. 1в распределения интенсивностей по каналам выделения приведены в виде развертки в плоскости /по аналогии с картой Вейтча/, параллелепипедами показаны интенсивности исходных комбинаций сигналов. Используя прямые методы отбора, мы в состоянии выделить лишь объем, ограниченный $\theta_{\text{мин}} \div \theta_{\text{макс}}$, $E_{\text{мин}} \div E_{\text{макс}}$. Применяя многоуровневое квантование, можно выделить события только на поверхности, образованной гиперболой $\theta \sim 1/E$, и тем самым существенно поднять коэффициент отбора.

Предположим, что искомое распределение событий задается функцией

$$N_{\Sigma} = \Phi(A_1, \dots, A_m), \quad /12/$$

а реальное распределение в конкретных условиях опыта имеет вид

$$N_p = F(A_1, \dots, A_m). \quad /13/$$

Тогда коэффициент отбора определится следующим образом:

$$K_{\text{отб}} = \frac{\Sigma F(A_1, \dots, A_m)}{\Sigma \Phi(A_1, \dots, A_m)}, \quad /14/$$

а функция связи между параметрами неявно будет задаваться следующим неравенством:

$$\Phi(A_1, \dots, A_m) > 0. \quad /15/$$

Быстрые процессоры, как правило, запускаются от систем отбора первого уровня. С точки зрения повышения коэффициента отбора к их разрешающему времени предъявляются высокие требования, определяемые /9/ и /10/. При выводе зависимости $K_{\text{отб}}$ от величины t_M молчаливо предполагалось, что выделение искомым событий по логической операции /3/ проводится либо одной многоходовой схемой совпадений, либо несколькими последовательно включенными схемами частных совпадений, мертвое время которых по выходу пренебрежимо мало. Быстрые процессоры отличаются тем, что в них время на выработку решения / t_M по выходу/ может быть довольно значительным. Мертвое время процессора складывается из времени преобразования линейного позиционного кода в двоичный /с целью ликвидации избыточности в представлении информации /2// и собственно времени реализации алгоритма отбора.

Преобразование кодов можно производить различными способами. Полярными вариантами являются последовательное преобразование /с помощью регистра сдвига и счетчика/ и параллельное преобразование с помощью схем приоритетной шифрации /5/. При последовательном способе время преобразования равно:

$$t_S = k_{tS} \cdot D_i, \quad /16a/$$

а требуемое количество интегральных схем

$$N_S = k_{NS} \cdot \log_2(1 + D_i). \quad /16b/$$

Соответственно при параллельном способе преобразования:

$$t_P = k_{tP} \cdot \log_2(1 + D_i), \quad /17a/$$

$$N_P = k_{NP} \cdot D_i, \quad /17b/$$

здесь k_t и k_N - соответствующие коэффициенты пропорциональности. Считая $k_{tS} \approx k_{tP}$, $k_{NS} \approx k_{NP}$, получим:

$$t_P \cdot N_P = t_S \cdot N_S. \quad /18/$$

Можно предположить, что промежуточные последовательно-параллельные способы преобразования кодов дают величину произведения, близкую к /18/, откуда

$$t_{\text{ип}} \approx \frac{t_S \cdot N_S}{N_{\text{ип}}} = \frac{t_P \cdot N_P}{N_{\text{ип}}}. \quad /19/$$

Если какой-то из параметров разбит на наибольшее число интервалов - $D_{\text{макс}}$, то для достижения наивысшей скорости преобразования кодов его надо вести параллельным способом. Для остальных параметров достаточны последовательно-параллельные способы, переходящие к последовательному по мере уменьшения числа интервалов. В этом случае при обеспечении минимального времени преобразования расход оборудования /и потребляемой мощности/ будет минимальным. Если $D_{\text{макс}}$ слишком велико, то количество требуемых интегральных схем для параллельного преобразования кодов может быть слишком большим, поэтому необходимо начинать с приемлемого по количеству оборудования ($N_{0\text{гр}}$) последовательно-параллельного способа кодирования, тогда время преобразования кодов и общее количество интегральных схем будут равны:

$$t_{\text{пр}} = k_t \cdot k_N \frac{D_{\text{макс}} \cdot \log_2(1 + D_{\text{макс}})}{N_{\text{гр}}}, \quad /20a/$$

$$N_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{гр}}}{D_{\text{макс}}} \cdot \sum_{i=1}^m D_i. \quad /20б/$$

Для интегральных схем серии MECL 10.000 /6/ можно оценить величины

$$t_{\text{IS}} \approx 2t_3 = 5 \text{ нс}, \quad /21a/$$

$$k_{\text{NS}} \approx 0,5 \text{ корпуса И.С./бит.} \quad /21б/$$

Задавшись $N_{\text{гр}} = 20$, $D_{\text{макс}} = 100$, получим $t_{\text{пр}} = 83 \text{ нс}$ /для сравнения $t_3 = 500 \text{ нс}$, $N_S = 3,3 \text{ корпуса И.С./}$.

Время реализации алгоритма отбора в сильной степени зависит от конкретной задачи, в практических схемах оно соизмеримо с временем преобразования кодов /7,8/.

В нашем примере мертвое время процессора на уровне 200 нс не приведет согласно /6/ к заметному снижению коэффициента отбора, поскольку мала интенсивность событий (N_{13}), поступающих на процессор с системы отбора первого уровня. Однако, если бы выделение соотношения $S\bar{A}\theta E$ /рис. 1б/ производилось также самим процессором /см. п.3 выводов первой части/, то его коэффициент отбора снизился бы в 2,5 раза.

Литература

1. Борисов А.А. и др. ПТЭ, 1973, №3, с.49.
2. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. Физматгиз., М., 1959.

3. Бушнин Ю.Б. и др. ИФВЭ СЭФ-74-106, Серпухов, 1974.
4. Verkerk С. Материалы Международного совещания по методике проволочных камер... Дубна, 1975. ОИЯИ, Д13-9164, Дубна, 1975.
5. Басиладзе С.Г., Смирнов В.А., Юдин В.К. ОИЯИ, 13-10026, Дубна, 1976.
6. Басиладзе С.Г. ПТЭ, 1976, №6, с.3.
7. Guzik Z., Basiladze S.G. Nucl. Instr. and Meth., 1974, vol. 114, p.83.
8. Басиладзе С.Г. и др. ОИЯИ, 13-10407, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 марта 1977 года.