

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 53.08

И. М. ИСЛАМОВ
 (Москва)

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗАТОР
 ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА
 С ИСТОЧНИКОМ ИОНОВ НА ОСНОВЕ КАЛИФОРНИЯ-252**

Во времяпролетном масс-спектрометре с источником ионов на основе калифорния-252 ионизация частиц из пробы происходит при их десорбции тяжелыми осколками деления ^{252}Cf с энергией около 1 МэВ/нуклон [1]. Десорбируются ионы с массой до 20 000 а. е. м., поэтому длительность временного спектра доходит до $\tau \sim 1$ мс при ускоряющем напряжении $V \sim 1$ кВ. Поскольку стартовые сигналы связаны со случайным пуассоновским процессом распада ^{252}Cf (интенсивность распада $\lambda \sim \sim 1000 \text{ с}^{-1}$), то происходит наложение временных спектров, что искажает в конечном итоге массовые спектры. Искажения тем сильнее, чем больше величина λt . Для малых $\lambda t \ll 1$ можно использовать методы из [2].

На рис. 1 представлена структурная схема времяпролетного масс-спектрометра (ВПМС) с источником ионов на основе калифорния-252. ВПМС состоит из трех блоков: времяпролетного массанализатора (ВПМА) I, многоканального временного анализатора (МВА) II и микроЭВМ III.

ВПМА включает следующие узлы: D_1 , D_2 — детекторы (микроканальные пластины (МКП)) для регистрации соответственно стартовых и стоповых сигналов; К — конвертор, ^{252}Cf — источник осколков распада ^{252}Cf ; О — образец; L_1 , L_2 — ускоряющая и отклоняющаяся линзы; Кл — ключ для подачи отклоняющегося напряжения при отдельной регистрации нейтральных частиц.

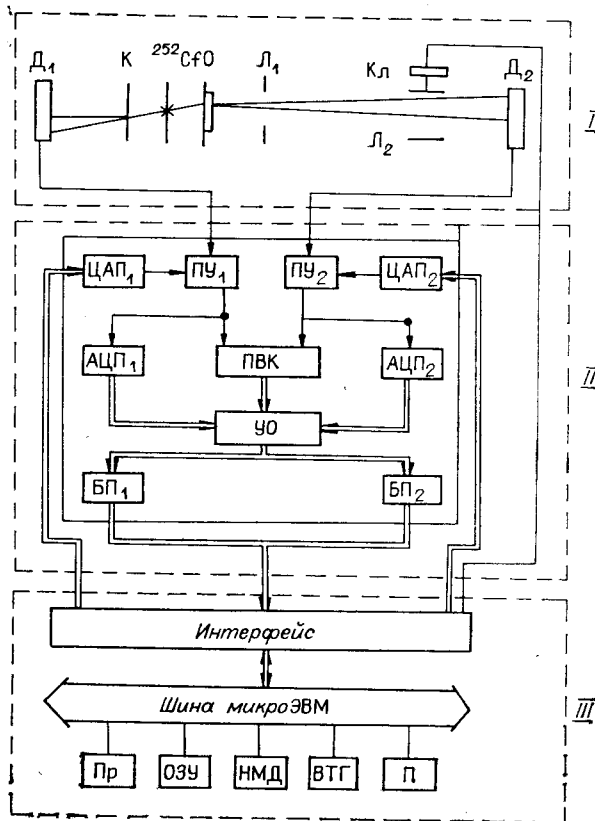


Рис. 1

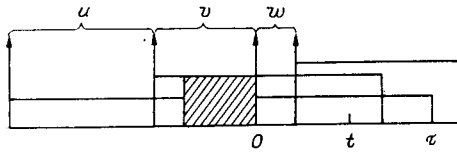


Рис. 2

МВА включает следующие узлы: ЦАП₁, ЦАП₂ — цифроаналоговые преобразователи для программной установки напряжений на пороговых устройствах ПУ₁ и ПУ₂ при выделении на фоне шумов соответственно стартовых сигналов и сигналов останова; ПВК — преобразова-

тель время — код; АЦП₁, АЦП₂ — аналого-цифровые преобразователи соответственно стартовых сигналов и сигналов останова; УО — устройство управления и обработки МВА; БП₁, БП₂ — буферные блоки памяти по 32×64 слов.

МикроЭВМ (ДВК-3) состоит из интерфейса, процессора (Пр), оперативно-запоминающего устройства 64 Кбайт (ОЗУ), накопителя на магнитном диске (НМД); графического видеотерминала (ВТГ) и печатающего устройства (П).

Буферные блоки памяти БП₁ и БП₂ состоят из 64 32-разрядных слов. В старшие два байта записывают значения от АЦП, а в младшие — значения от ПВК. Значения в ЦАП и сигнал на Кл подают программно до начала амплитудного накопления спектра.

Информация от ПВК, АЦП₁ и АЦП₂ может быть предварительно обработана в УО, тогда на долю микроЭВМ остается только задача инкрементного накопления спектра. В этом случае аппаратные затраты в МВА будут большими. Аппаратное упрощение узла УО в МВА связано с усложнением программы обработки и накопления в микроЭВМ. При реальных условиях $\lambda \sim 1000 \text{ с}^{-1}$ современные микроЭВМ, например ДВК-3, обеспечивают программную обработку.

Проведем анализ погрешностей наложения спектров при различных вариантах узла управления и обработки УО МВА.

Пусть $F(t)$ — искаженный в МВА масс-спектр; $f(t)$ — плотность вероятности появления сигнала останова при каждом стартовом сигнале; T — общее время накопления масс-спектра.

1. Пусть, в свою очередь, ПВК содержит один счетчик и УО функционирует следующим образом. Если зарегистрирован какой-то стартовый сигнал, то в течение длительности τ временного спектра регистрируются только сигналы останова, а стартовые — игнорируются. На рис. 2 вертикальными стрелками указаны стартовые сигналы, появившиеся в случайные моменты $0, u, u + v, u + v + w$. Из рисунка видим, что стартовые сигналы в моменты 0 и $u + v$ системой регистрируются, а в моменты u и $u + v + w$ не регистрируются.

Амплитуда временной спектральной линии текущего (при старте в момент $u + v$) временного спектра в момент t определяется тремя слагаемыми:

$$F(t) = \lambda T e^{-\lambda t} f(t) + \lambda T \int_t^{\tau} \int_{\tau-u}^{\tau-t} f(v+t) de^{-\lambda v} de^{-\lambda u} + \lambda T \int_0^t \int_{\tau}^{\infty} f(t-w) de^{-\lambda u} de^{-\lambda w}. \quad (1)$$

Первое слагаемое связано с тем, что не будет наложения предшествующего регистрируемого спектра (старт в момент 0) на текущий регистрируемый спектр. Второе слагаемое означает, что между двумя регистрируемыми спектрами может оказаться незарегистрированный масс-спектр (старт в момент u), который пересечется в текущем спектре с линией в точке t . Третье слагаемое характеризует то, что при регистрации текущего спектра появится нерегистрируемый спектр в точке $u + v + w$ и накроет линию в точке t (если, конечно, $w < t$).

Введя обозначения $\xi = v + t$ и $\eta = t - w$ и проведя преобразования в (1), получим

$$F(t) = \lambda T e^{-\lambda t} f(t) + \lambda T e^{\lambda t} \int_t^{\tau} \int_{\tau-u+t}^{\tau} f(\xi) de^{-\lambda \xi} de^{-\lambda u} + \lambda T e^{-\lambda(\tau+t)} \int_0^t f(\eta) de^{\lambda \eta}. \quad (2)$$

Из рис. 2 видим, что сигналы останова, появляющиеся в интервале времени от τ до $u + v$, системой не регистрируются. Поэтому вероятность того, что спектральная линия t окажется незарегистрированной, будет выражаться формулой

отсутствуют и амплитуда временной спектральной линии в момент $t \in [0, \tau]$

$$F(t) = \lambda T e^{-\lambda t} f(t) + \lambda T \int_0^{\tau-t} e^{-\lambda u} f(t+u) d(\lambda u). \quad (4)$$

Перейдя к новой переменной $\xi = t + u$, из (4) получим интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода:

$$F(t) = \lambda T e^{-\lambda t} f(t) + \lambda T e^{\lambda t} \int_t^{\tau} e^{-\lambda \xi} f(\xi) d(\lambda \xi). \quad (5)$$

Известно [3], что уравнение (5) имеет единственное решение. Дискретизация уравнения (5) приводит к системе линейных уравнений с треугольной матрицей:

$$F_k = \lambda T e^{-\frac{k}{n}\lambda\tau} f_k + \lambda T \sum_{i=0}^{n-k} \left(e^{-\frac{i}{n}\lambda\tau} - e^{-\frac{i+1}{n}\lambda\tau} \right) f_{k+i}, \quad k = \overline{n, 1}, \quad (6)$$

где n — число шагов квантования МВА; $f_i = f(i\lambda\tau/n)$; $F_i = F(i\lambda\tau/n)$. Схема решения системы (6) имеет вид

$$f_k = (F_k - S_k)/a_k, \quad k = \overline{n, 1}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a_k &= \lambda T \left(1 - e^{-\frac{1}{n}\lambda\tau} + e^{-\frac{k}{n}\lambda\tau} \right); \\ S_n &= 0; S_k = \sum_{i=1}^{n-k} b_i f_{k+i}, \quad k = \overline{n-1, 1}; \\ b_i &= \lambda T \left(e^{-\frac{i}{n}\lambda\tau} - e^{-\frac{i+1}{n}\lambda\tau} \right). \end{aligned}$$

Если организовать вычисления по схеме (7), то потребуется произвести объем операций порядка n^2 . Для 16-разрядных МВА эта величина $n^2 = 2^{32} \simeq 4 \cdot 10^9$. Такой объем операций на современных микрокомпьютерах за разумное время (~ 1 мин) не осуществим. Получим рекуррентные формулы для (7). Заметим, что $b_i = e^{\frac{k}{n}\lambda\tau} b_{i+k}$, и поэтому имеет место соотношение

$$S_k = b_1 f_{k+1} + e^{-\frac{1}{n}\lambda\tau} S_{k+1}. \quad (8)$$

Исключая S_k из (7) и (8), получим рекуррентную формулу

$$f_k = \frac{F_k - e^{-\frac{1}{n}\lambda\tau} F_{k+1} + e^{-\frac{k+2}{n}\lambda\tau} f_{k+1}}{a_k}, \quad k = \overline{n, 1}, \quad (9)$$

если $f_k < 0$, то присваивают $f_k = 0$.

С учетом особенности пуассоновских потоков, т. е. дисперсии $DF_k = F_k$, из (9) получим

$$Df_k = \frac{F_k + e^{-\frac{2}{n}\lambda\tau} F_{k+1} + e^{-2\frac{k+2}{n}\lambda\tau} Df_{k+1}}{a_k^2}, \quad k = \overline{n, 1}. \quad (10)$$

Теперь схемы (9), (10) требуют объема операций порядка n , что возможно осуществить на современных компьютерах за время порядка секунды.

3. Рассмотрим МВА, в котором блок УО исключает наложившиеся спектры [4]. Тогда

$$F(t) = \lambda T e^{-2\lambda t} f(t). \quad (11)$$

Относительная погрешность в каждом канале будет $e^{\lambda t} / \sqrt{f(t)}$, а потери составят $(1 - e^{-2\lambda t})$ -ю часть по всем каналам.

4. Рассмотрим МВА, в котором блок УО исключает пересекающиеся участки спектров. Тогда

$$F(t) = \lambda T e^{-\lambda t} f(t). \quad (12)$$

Потери займут по всем каналам $(1 - e^{-\lambda t})$ -ю часть, которая аппаратно реализуется с двумя счетчиками. Относительная погрешность в каждом канале составляет $\sqrt{e^{\lambda t} / f(t)}$.

5. Рассмотрим МВА, в котором счетчик работает циклически и независимо от поступления стартовых сигналов и сигналов останова. Предлагается записывать в память значения счетчика в моменты поступления тех или других сигналов. Момент переполнения счетчика также фиксируется в памяти, так что показания счетчика используются как временная координата, на которой отмечены события стартовых сигналов, сигналов останова и сигнала прохождения очередного цикла счетчика (т. е. заданного интервала времени).

Осуществить эту идею можно следующим образом. В двух разрядах каждого 32-разрядного слова записывают тип сигналов: 11 — если поступил сигнал сброса счетчика, 01 — если поступил стартовый сигнал, и 10 — сигнал останова. Эти два разряда можно выделить или в старших (обычно разрядность АЦП не больше 14 или возможен подбор соответствующего динамического диапазона и кванта дискретизации), или в младших двух байтах, тогда разрядность счетчика не должна превышать 14. Если в разрядах типов сигнала записаны 11, то в остальные разряды информацию от АЦП и счетчика не записывают.

Пятый вариант МВА аппаратно реализуется проще остальных, а программа обработки — сложнее. При этом алгоритмы первых четырех вариантов можно реализовать программно.

Проведем анализ представленных пяти вариантов МВА.

Из формул (2) — (4), (11), (12) видим, что при $\lambda t \ll 1$ эффективность всех методов с точки зрения коэффициента сбора и точности восстановления истинного спектра одинакова. При $\lambda t \geq 1$ ситуация меняется.

Недостаток метода 1 в том, что часть сигналов останова не регистрируется (3). Кроме того, истинная спектральная линия в точке t искажается как предыдущими, так и последующими линиями. Поэтому восстановление истинного спектра требует объема операций порядка n^3 , что в практических случаях нереализуемо. Преимущество 3-го и 4-го методов заключается в том, что спектры не искажаются. Метод 4 эффективнее по коэффициенту сбора сигналов останова в $e^{\lambda t}$ раз по сравнению с методом 3. Во столько же раз метод 2 эффективнее по коэффициенту сбора метода 4. Однако метод 2 по сравнению с методом 4 требует программного восстановления истинного спектра по рекуррентной формуле (9). Обратим внимание еще на один важный момент. Аппаратная реализация методов 1—4 ограничивает динамический диапазон спектров разрядностью счетчиков и требует программной установки числа разрядов счетчиков в специальном регистре МВА, определяемого длительностью временного

спектра. В этом случае требуется в среднем на 25 % больше времени на накопление, если ускоряющее напряжение и длину времяпролетного анализатора выбирают независимо от характеристик МВА, что и имеет место на практике. Метод 5 лишен этого недостатка, и при этом методы 2 и 4 можно реализовать программно. Анализируя относительные погрешности $\sqrt{Df_k}/f_k$ обоих методов, можно определить, какую программу (по методу 2 или 4) следует реализовать.

Пусть m — номер интересующего канала. Выбирается тот результат из двух методов, который имеет минимум $\sqrt{Df_k}/f_k$. Для метода 4

$$\frac{\sqrt{Df_m}}{f_m} = \left(\frac{e^{\lambda\tau}}{\lambda T f_m} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

Для метода 2 рассмотрим случай влияния канала k на канал $m < k$:

$$\frac{\sqrt{Df_m}}{f_m} = \left[\frac{1 + \frac{c_{km} f_k}{a_m f_m} \left(1 + \frac{c_{km}}{a_k} \right)}{\lambda T f_m \left(1 - e^{-\frac{1}{n} \lambda\tau} + e^{-\frac{m}{n} \lambda\tau} \right)} \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где
$$c_{km} = \lambda T e^{-\frac{k-m}{n} \lambda\tau} \left(1 - e^{-\frac{1}{n} \lambda\tau} \right). \quad (15)$$

Из формул (13) — (15) видим, что по критерию $\sqrt{Df_m}/f_m$ при одних условиях эффективен метод 2, а при других — метод 4. Так, при неравенстве

$$\frac{f_k}{f_m} < \frac{e^{\lambda\tau} \left(1 - e^{-\frac{1}{n} \lambda\tau} + e^{-\frac{m}{n} \lambda\tau} \right) - 1}{\frac{c_{km}}{a_m} \left(1 + \frac{c_{km}}{a_k} \right)}$$

эффективен метод 2, а при обратном — метод 4.

Автор выражает признательность Е. Г. Звереву, А. И. Дряннову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Macfarlane R. D., Torgerson D. F. Californium-252 plasma desorption mass-spectroscopy // Science.— 1976.— N 191.— P. 920.
2. Данилевич В. В., Новиков Е. В. Многоканальные системы статистического временного анализа случайных потоков сигналов (обзор) // ПТЭ.— 1987.— № 3.
3. Лизоркин П. И. Курс дифференциальных и интегральных уравнений с дополнительными главами анализа.— М.: Наука, 1981.
4. Hedin A., Hakansson P., Sundqvist B. U. R. Event mixing effects in fast heavy-ion-induced desorption time of flight mass-spectrometry // Int. J. Mass-Spectr. Ion Proces.— 1986.— 70.— P. 203.

Поступила в редакцию 13 декабря 1989 г.

УДК 681.3.019

В. А. ВИТТИХ, В. А. КИРЕЕВ, О. П. СКОБЕЛЕВ

(Куйбышев)

КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ СБОРА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Существуют многочисленные явления, процессы и технические объекты, изучение которых связывается с необходимостью измерения сотен, тысяч и даже десятков тысяч физических параметров, преобразуемых с помощью датчиков, причем среди них подавляющее большинство составляют группы однородных параметров. В результате средства сбора