Здесь $\hat{c}_i(t)=c_i(t_s)+k[c_i(t_{s+1})-c_i(t_s)]$; $c_i(t_s)$ — коэффициенты статистической интерполяционной формулы, $i=1, 2, \ldots, m$.

Коэффициенты $c_i(t_s)$ $(i=1, 2, \ldots, m)$ могут быть вычислены заранее и храниться в памяти ЭВМ. Учитывая равенства некоторых $c_i(t_s)$, следует хранить $m^2/2$ коэффициентов при четном m и $(m+1)m/2$ при нечетном.

Формула для относительного среднеквадратичного отклонения метода статистической фильтрации с последующей линейной интерполяцией имеет вид

$$\xi^2(t)=1+\left(1+\frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_x^2}\right)\sum_{i=1}^{m}\hat{c}_i^{\,2}(t)+\sum_{i=1}^{m-1}\left\{\left[\rho_x(i\Delta t)+\frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_x^2}\rho_\eta(i\Delta t)\right]\times\right.$$

$$\left.\times\sum_{\substack{j,r=1;\\ j-r=i}}^{m}\hat{c}_j(t)\,\hat{c}_r(t)\right\}-2\sum_{i=1}^{m}\hat{c}_i(t)\,\rho_x(\Delta t_i),$$

где $\sum\limits_{\substack{j,r=1;\\ j-r=1}}^{m}$ означает суммирование по j и r от 1 до m при $j-r=i$.

Исследования показали, что $\max\xi^2(\Delta t)$ этого метода столь незначительно отличается от соответствующей зависимости метода статистической интерполяции, что на рисунке, обе кривые сливаются в одну. Для рассмотренных типов случайных процессов и помех увеличение количества отсчетов до трех и четырех не приводит к существенному уменьшению $\max\xi^2(t)$. Хорошие результаты позволяет получить скользящая интерполяция по четырем отсчетам (см. рисунок). Однако при выборе m следует помнить, что точность оценок корреляционных функций падает с увеличением сдвига $\tau=i\Delta t$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиржуков А. Я., Хрумало В. М., Хуснутдинов Г. П. Инженерные методы назначения шага дискретизации.— Труды III Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей». Л., изд. ВНИИЭП, 1970.
2. Каримов Р. Н., Некрасов В. Ф. Использование метода статистической интерполяции при дискретизации случайного процесса с помехой.— Труды VIII Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей». Каунас, изд. ВНИИЭП, 1975.
3. Ефимов В. М. Квантование по времени при измерении и контроле. М., «Энергия», 1969.

Поступило в редакцию 4 ноября 1974 г.;
окончательный вариант — 1 июля 1976 г.

УДК 519.2+(016.3)

Т. А. АЛИЕВ

(Баку)

К ПРИНЦИПАМ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ

В настоящее время для определения корреляционных функций широко применяются мультипликационные, релейные и знаковые корреляторы [1—3], в которых вычисления производятся по следующим выражениям соответственно

$$R_{xx,\text{м}}(\tau_i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}X(t_i)\,X(t_j+\tau_i); \tag{1}$$

$$R_{xx,\text{р}}(\tau_i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}X(t_j)\operatorname{sgn}X(t_j+\tau_i); \tag{2}$$

$$R_{xx,\text{зн}}(\tau_i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\operatorname{sgn}X(t_j)\operatorname{sgn}X(t_j+\tau_i). \tag{3}$$

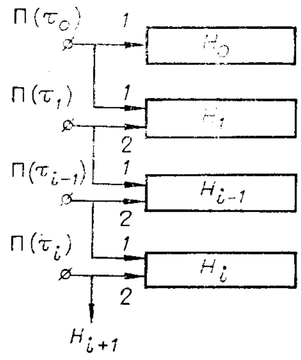

Рис. 1.

где $j=\overline{0, n}$; $i=\overline{0, q}$; $X(t_j)$ — случайный процесс, квантованный по уровню и времени; τ_i — сдвиг во времени, который необходимо создавать в i-м канале.

В цифровых многоканальных корреляторах значения корреляционных функций для всех τ_i по всем каналам ($i=\overline{1, q}$) определяются параллельно путем накопления соответствующих произведений сумматорами или счетчиками, которые содержат большое количество разрядов [2, 4]. В этом заключается одна из причин громоздкости и сложности многих известных многоканальных корреляторов.

В данной работе рассматриваются принципы организации накопления произведений, позволяющие существенно упростить все вышеуказанные корреляторы.

Анализ алгоритмов вычислений и принципов построения известных многоканальных цифровых корреляторов [1—3] показал, что значения сумм произведений, которые накапливаются в соответствующих каналах, содержат определенную избыточную информацию и для минимизации оборудования этих устройств требуется исключение избыточности. Для этого необходимо только в первом канале, т. е. при нулевом значении временного сдвига (τ_0), определять сумму указанных произведений, а в остальных каналах (τ_i) накапливать разности произведений предыдущего и данного каналов. При этом в накопителях получим:

$$\sum_{j=1}^{n} X(t_j)\, X(t_j+\tau_{i-1}) - \sum_{j=1}^{n} X(t_j)\, X(t_j+\tau_i) = \Delta\Pi_{\text{м},i}; \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{n} X(t_j)\operatorname{sgn} X(t_j+\tau_{i-1}) - \sum_{j=1}^{n} X(t_j)\operatorname{sgn} X(t_j+\tau_i) = \Delta\Pi_{\text{р},i}; \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \operatorname{sgn} X(t_j)\operatorname{sgn} X(t_j+\tau_{i-1}) - \sum_{j=1}^{n} \operatorname{sgn} X(t_j)\operatorname{sgn} X(t_j+\tau_i) = \Delta\Pi_{\text{зн},i}. \tag{6}$$

По значениям разностей сумм произведений $\Delta\Pi_{\text{м},i}$; $\Delta\Pi_{\text{р},i}$; $\Delta\Pi_{\text{зн},i}$ можно определить разности ординат корреляционных функций, т. е.

$$(1/n)\,\Delta\Pi_{\text{м},i} = R_{xx,\text{м}}(\tau_{i-1}) - R_{xx}(\tau_i) = \Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_i), \tag{7}$$

при этом деление значений $\Delta\Pi_{\text{м},i}$; $\Delta\Pi_{\text{р},i}$; $\Delta\Pi_{\text{зн},i}$ на $n=2^k$ практически сводится к определению места запятой в содержимом соответствующего накопителя. Используя величины $R_{xx,\text{м}}(\tau_0)$; $R_{xx,\text{р}}(\tau_0)$; $R_{xx,\text{зн}}(\tau_0)$ и $\Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_0)$; $\Delta R_{xx,\text{р}}(\tau_0)$; $\Delta R_{xx,\text{зн}}(\tau_0)$, можно построить корреляционную функцию.

Естественно, что такие корреляторы будут отличаться от известных в основном организацией накопления произведений. Один из возможных вариантов накопления разностей произведений приведен на рис. 1, где j-е произведения в выражениях (1)—(4), (6) по каналу i обозначены $\Pi_j(\tau_j)$, а накопитель i-го канала — H_i. Причем если знак произведения $\Pi_j(\tau_i)$ положителен, то при подаче на вход *1* накопителя H_i это произведение прибавляется к его содержимому, если отрицательный то вычитается. Если произведение подается на вход *2*, то происходит обратное. При таком накоплении произведений по окончании вычислений в накопителе H_0 получится сумма $\sum_{j=1}^{n} \Pi_j(\tau_0)$, а в накопителях H_i — разность сумм $\sum_{j=1}^{n} \Pi_j(\tau_{i-1}) - \sum_{j=1}^{n} \Pi_j(\tau_i)$, которая для мультипликационных корреляторов равна $\Delta\Pi_{\text{м},i}$, для релейных — $\Delta\Pi_{\text{р},i}$, для знаковых — $\Delta\Pi_{\text{зн},i}$. Понятно, что при вычислении взаимно корреляционных функций будут накапливаться произведения $\Pi_j(\tau_i)$, имеющие соответственно следующий вид: $X(t_j)Y(t_j+\tau_i)$; $X(t_j)\operatorname{sgn} Y(t_j+\tau_i)$; $\operatorname{sgn} X(t_j+\tau_i)$.

Максимальное значение разрядности накопителя *1*-го канала (см. рис. 1) равно разрядности накопителей известных корреляторов, а в остальных каналах определяется по выражениям:

$$m_{\text{м},i} \geqslant \log_2 \Delta\Pi_{\text{м},i(\max)}; \tag{8}$$

$$m_{\text{р},i} \geqslant \log_2 \Delta\Pi_{\text{р},i(\max)}; \tag{9}$$

$$m_{\text{зн},i} \geqslant \log_2 \Delta\Pi_{\text{зн},i(\max)}. \tag{10}$$

Для тех случаев, когда определения $\Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_i)$; $\Delta R_{xx,\text{р}}(\tau_i)$; $\Delta R_{xx,\text{зн}}(\tau_i)$ не позволяют устранить избыточность разрядов накопителей, более целесообразно вычисление $\Delta'\Pi_i$ по выражению

$$\Delta'\Pi_i = \Delta\Pi_{i-1} - \Delta\Pi_i = \sum_{j=1}^{n} [\Pi_j(\tau_i) - 2\Pi_j(\tau_{i-1}) + \Pi_j(\tau_{i-2})], \tag{11}$$

так как определение $\Delta'\Pi_{\text{м},i}$; $\Delta'\Pi_{\text{р},i}$; $\Delta'\Pi_{\text{зн},i}$ в накопителях соответствующих корреляторов потребляет несколько меньше элементов и по ним также можно определить $\Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_i)$; $\Delta R_{xx,\text{р}}(\tau_i)$; $\Delta R_{xx,\text{зн}}(\tau_i)$, например,

$$\Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_i) = \Delta R_{xx,\text{м}}(\tau_{i-1}) - (1/n)\,\Delta'\Pi_{\text{м},i}. \tag{12}$$

На рис. 2 показан один из возможных вариантов определения $\Delta'\Pi_i$, где в первом канале накапливается $\sum_{j=1}^{n}\Pi_j(\tau_0)$, во втором $-\sum_{i=1}^{n}[\Pi_j(\tau_0) - \Pi_j(\tau_1)]$, в i-м— $\sum_{j=1}^{n}[\Pi_j(\tau_i) - 2\Pi_j(\tau_{i-1}) + \Pi_j(\tau_{i-2})]$. Входы накопителей выполняют те же функции, что и на рис. 1, отличием является только то, что через вход 2 информация поступает не на первый, а на второй разряд накопителя H_i, т. е. со сдвигом на один разряд; это позволяет при подаче на этот вход $\Pi_j(\tau_{i-1})$ увеличить или уменьшить его содержимое на $2\Pi_j(\tau_{i-1})$. При этом в соответствующих корреляторах разрядность накопителя i-го канала будет равна

$$m_{\text{м},i} \geqslant \log_2 \Delta'\Pi_{\text{м},i(\max)}; \tag{13}$$

$$m_{\text{р},i} \geqslant \log_2 \Delta'\Pi_{\text{р},i(\max)}; \tag{14}$$

$$m_{\text{зн},i} \geqslant \log_2 \Delta'\Pi_{\text{зн},i(\max)}. \tag{15}$$

Таким образом, количество разрядов накопителей на рис. 1, 2 определяется максимальными значениями $\Delta\Pi_{\text{м},i}$; $\Delta\Pi_{\text{р},i}$; $\Delta\Pi_{\text{зн},i}$; $\Delta'\Pi_{\text{м},i}$; $\Delta'\Pi_{\text{р},i}$; $\Delta'\Pi_{\text{зн},i}$, которые, в свою очередь, зависят от количества отсчетов n, разрядности исходных данных X_j, количества каналов q и от класса корреляционных функций.

Количество каналов q также зависит от класса корреляционных функций. Если корреляционная функция имеет колебательный характер или ее вариация между соседними точками существенна, то для таких случаев проектируются корреляторы с большим количеством каналов. Когда по полученным в накопителях результатам возможно с достаточной точностью представить корреляционную функцию в непрерывной форме, тогда максимальное значение разностей их ординат практически всегда оказывается во много раз меньше максимальных значений самих ординат. Поэтому на разрядность накопителей рис. 1 и 2 решающее влияние оказывает количество каналов коррелятора, а зависимость количества разрядов от класса корреляционных функций при правильном выборе количества каналов практически не приводит к существенному различию в количестве разрядов накопителей и при применении выражений (4) и (12) всегда требуются накопители со значительно меньшим количеством разрядов, чем обычные корреляторы.

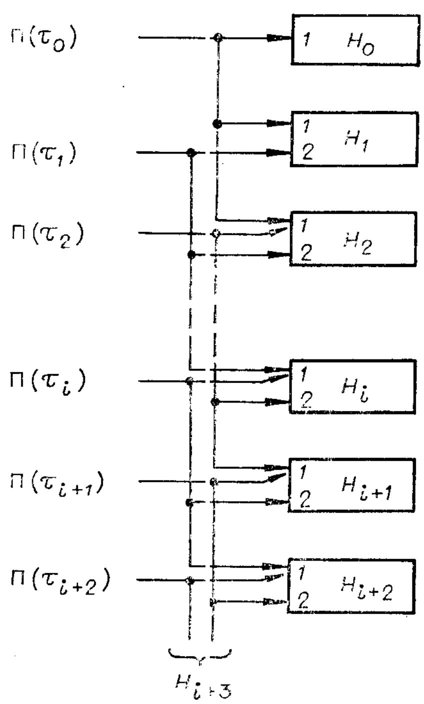

Рис. 2.

Как известно, при обычном методе вычислений погрешность оценки ординат корреляционных функций в основном зависит от количества отсчетов n и от разрядности исходных данных X_i, по которым определяется разрядность накопителей известных устройств [2]. В приведенных на рис. 1, 2 вариантах вы-

q	$l=6,\ n=512$			$l=6,\ n=1024$			$l=6,\ n=2048$			$l=6,\ n=4096$		
	$m_{м}$	$m_{р}$	$m_{зн}$	$m_{м}$	$m_{р}$	$m_{зн}$	$m_{м}$	$m_{р}$	$m_{зн}$	$m_{м}$	$m_{р}$	$m_{зн}$
1	21	15	9	22	16	10	23	17	11	24	18	12
8	19; 14	13; 8	7; 4	20; 14	14; 8	8; 4	21; 14	15; 8	9; 4	22; 14	16; 8	10; 5
16	18; 14	12; 8	6; 4	19; 14	13; 8	7; 4	20; 14	14; 8	8; 4	21; 14	15; 8	9; 5
32	17; 13	11; 8	5; 3	18; 13	12; 8	6; 3	19; 13	13; 8	7; 4	20; 13	14; 8	8; 4
64	16; 13	10; 8	4; 3	17; 13	11; 8	5; 3	18; 13	12; 8	6; 3	19; 13	13; 8	7; 4
128	15; 13	9; 8	3; 3	16; 13	10; 8	4; 3	17; 13	11; 8	5; 3	18; 13	12; 8	6; 3

числения дополнительная погрешность не возникает. В этом можно убедиться, если допустить, что имеются три группы устройств, из которых 1-я определяет известным способом $R_{xx,м}(\tau_i)$; $R_{xx,р}(\tau_i)$; $R_{xx,зн}(\tau_i)$, 2-я — $\Delta\Pi_{м,i}$, $\Delta\Pi_{р,i}$; $\Delta\Pi_{зн,i}$; 3-я — $\Delta'\Pi_{м,i}$; $\Delta'\Pi_{р,i}$; $\Delta'\Pi_{зн,i}$, и на входы всех трех групп поступают одни и те же данные. При этом очевидно, что если в накопителях не производится округление вычислений и не допускается переполнение разрядной сетки, то по полученным результатам 2-й и 3-й групп можно точно определить результаты вычислений в соответствующих накопителях 1-й группы.

В таблице в качестве примера приведены необходимые количества разрядов, которые определены по максимальной величине абсолютных значений ординат соседних точек корреляционных функций и их первых и вторых разностей из результатов обработки сигналов типовых нефтеперерабатывающих объектов. При этом разрядность в исходных данных X_j была принята равной 6; количество каналов $q=8$, 16, 32, 64, 128; количество выборок $n=512$, 1024, 2048, 4096. Числа первой строки всех столбцов показывают количество разрядов накопителей соответствующих известных корреляторов накопителей *1*-го канала по рис. 1 и 2. В последующих строках каждого столбца приведены два числа, равные количеству разрядов накопителей остальных каналов при определении $\Delta\Pi(\tau_i)$ и $\Delta'\Pi(\tau_i)$ соответственно. Данные таблицы подтверждают экономичность накопителей по рис. 1 и 2. Однако такие накопители должны осуществлять не только операцию сложения, но и вычитания. Известно, что на практике только лишь в мультипликационных корреляторах, выполняющих вычисления корреляционных функций нецентрированных случайных процессов, не требуется выполнение операций вычитания, а во всех релейных, знаковых и мультипликационных корреляторах, предназначенных для определения корреляционных функций центрированных случайных процессов, требуется выполнение операции сложения и вычитания. Поэтому в этих устройствах в качестве накопителей используются реверсивные счетчики, реверсивные сумматоры или же операция вычитания заменяется сложением обратных или дополнительных кодов числа. В рассматриваемых схемах рис. 1, 2 для накопления результатов вычислений также можно использовать реверсивные счетчики или сумматоры, и при этом не требуется дополнительных вычитателей.

На основе предложенных в работе принципов можно построить многоканальные мультипликационные, релейные, знаковые корреляторы, которые, имея одинаковые метрологические характеристики с аналогичными известными устройствами, потребуют значительно меньше оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балл Г. А. Аппаратурный корреляционный анализ случайных процессов. М., «Энергия», 1968.
2. Грибанов Ю. И., Веселова Г. П., Андреев В. Н. Автоматические цифровые корреляторы. М., «Энергия», 1971.
3. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М., «Энергия», 1973.
4. Домарацкий А. Н., Иванов Л. Н., Карышев Е. Н., Синицын Б. С. Дискретная измерительная корреляционная система. Новосибирск, «Наука», 1965.

Поступило в редакцию 10 января 1975 г.;
окончательный вариант — 10 августа 1976 г.