

Методы и системы обработки измерительной информации
с помощью специализированных вычислительных машин

УДК 681.833 : 519.2

А. Н. ДОМАРАЦКИЙ, Л. Н. ИВАНОВ, Е. Н. КАРЫШЕВ,
В. А. ПОПОВ, А. И. СКУРЛАТОВ, А. Н. СМОРОДИНОВ
(НОВОСИБИРСК)

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ
ОПЕРАТИВНЫЙ КОРРЕЛЯТОР КАЦО-240

Применение корреляционного анализа в научных исследованиях дает экспериментатору средство, которое часто является наиболее эффективным при достижении цели. Функции корреляции в современных методах исследования имеют такое же значение, что и частотные спектры. К сожалению, для большинства инженеров корреляционные и взаимные корреляционные функции не имеют такого значения, какое имеют частотные спектры. Вероятно, это является следствием недостатка опыта в применении корреляционного анализа и отсутствия соответствующих устройств обработки.

В публикуемой работе кратко рассматриваются методы построения устройств обработки для осуществления корреляционного анализа в реальном масштабе времени, даются основные характеристики разработанного прибора и приводятся возможные области его применения.

Для проведения корреляционного анализа в ритме с экспериментом вычислительная часть устройства (коррелятора) должна обладать высоким быстродействием. Поэтому приходится отказаться от простых одноканальных схем и перейти к многоканальным, обеспечивающим одно-временное измерение большого числа точек корреляционной функции $K(\tau)$ [1, 2].

Действительно, время вычисления n точек $K(\tau)$ на интервале усреднения T для одноканального коррелятора составит $t_b = n T$, где

$$n = \frac{\tau_{\max}}{\Delta \tau} + 1, \quad (1)$$

а $\Delta \tau$ и τ_{\max} обычно принимают равными:

$$\Delta \tau = \frac{1}{mf_b} \quad (m = 4 \div 10); \quad \tau_{\max} = \frac{1}{f_n}, \quad (2)$$

т. е.

$$t_b = \left(\frac{mf_b}{f_n} + 1 \right) T = (m\gamma + 1) T. \quad (3)$$

Здесь f_b и f_n — соответственно верхняя и нижняя ожидаемые частоты спектра исследуемого случайного сигнала; γ — коэффициент перекрытия по частоте. Из (3) следует, что применение одноканальных корреляторов вызывает чрезвычайно большое время анализа.

Основные препятствия при построении многоканальных корреляторов заключаются в построении схем устройств задержки и умножения. Широко распространенные в корреляционной технике способы создания временного сдвига путем использования аналоговых линий задержки или транспортного запаздывания чаще всего неприменимы или сложны для корреляторов оперативного анализа. Наибольший интерес при построении блока задержки представляет принцип естественного течения времени [2, 3], применимый в устройствах, работающих по алгоритму

$$K_{xy}(j \Delta \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i \Delta t) y(i \Delta t + j \Delta \tau) \quad (4)$$

при соблюдении условия

$$\Delta t \geq (n - 1) \Delta \tau = \tau_{\max},$$

где Δt и $\Delta \tau$ — интервалы временной дискретизации сигналов x и y в каналах коррелятора. Условие $\tau_{\max} > \tau_{\text{кор}}$ означает некоррелированность выборки при образовании парных произведений в (4).

Принцип естественного течения времени обеспечивает построение многоканального коррелятора, в котором используется вместо n умножителей лишь один, а с увеличением числа каналов увеличивается только число интеграторов [1—3] или длина цифровой линии задержки [4].

Значительное упрощение умножителей достигается в случае применения алгоритмов полярной, релейной и стилтьесовой корреляции [1, 2, 5]. При этом умножители приобретают чрезвычайно простой вид, могут быть реализованы на элементах цифровой техники и обладать высоким быстродействием. Однако следует отметить, что полярный и релейный алгоритмы применимы лишь для обработки случайных сигналов с нормальным распределением. Стилтьесов алгоритм обеспечивает практически удовлетворительную точность вычисления корреляционных функций для сигналов с симметричным распределением уже при четырех уровнях квантования.

Таким образом, при построении оперативных корреляторов целесообразно использование принципов естественного течения времени и стилтьесовой корреляции. Первый позволяет просто реализовать временную задержку и использовать в многоканальной схеме лишь один умножитель. Применение второго значительно упрощает схему умножителя при сохранении высокой точности вычислений.

Достаточно распространенными в технике и научных экспериментах являются широкополосные случайные сигналы, характеризующиеся коэффициентом перекрытия по частоте $\gamma \geq 10^2$. Необходимое число точек вычисления корреляционной функции определим из (1) — (2): $n = m\gamma + 1$, откуда следует, что реализация многоканальных устройств для обработки широкополосных сигналов требует больших затрат оборудования. Так, например, при $\gamma = 10^3$ в схемах корреляторов [6, 7] потребуется $(4 \div 10) \cdot 10^3$ умножителей и интеграторов, что практически нецелесообразно.

Трудности, возникающие при разработке корреляторов оперативного анализа для обработки широкополосных случайных сигналов, в значительной степени можно преодолеть, если отказаться от равномерного шага коррелограммы и перейти к постепенно увеличивающемуся шагу, например, по закону геометрической прогрессии:

$$\Delta \tau_n = \Delta \tau_1 p^{n-1}, \quad (5)$$

где $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_n$ — соответственно начальный и n -ый шаг временной дискре-

тизации корреляционной функции; p — знаменатель геометрической прогрессии ($p > 1$); n — число вычисляемых точек $K(\tau)$. При этом точки на оси τ располагаются с уменьшающейся плотностью по мере затухания высокочастотных составляющих корреляционной функции. Для того чтобы погрешность восстановления корреляционной функции при увеличивающемся шаге квантования не превышала погрешности при равномерном квантовании $\Delta\tau = \text{const}$, необходимо выполнение условия $\Delta\tau_1 < \Delta\tau$ или

$$\Delta\tau_1 = \beta\Delta\tau \quad (\beta < 1). \quad (6)$$

Знаменатель геометрической прогрессии p и начальный шаг $\Delta\tau_1$ можно оценить, задавшись необходимым числом отсчетов m на период ожидаемой высокой частоты f_b спектра сигнала и коэффициентом начального шага β . При этом число отсчетов m на период f_b при равномерном и неравномерном квантовании принимается одинаковым. Поскольку для равномерного квантования (2) $m\Delta\tau = \frac{1}{f_b}$, то, пользуясь выражением для суммы геометрической прогрессии, можно записать

$$\frac{1}{f_b} = \Delta\tau_1 \frac{p^m - 1}{p - 1} \quad \text{или} \quad m\Delta\tau = \beta\Delta\tau \frac{p^m - 1}{p - 1},$$

откуда

$$p^m - ap + b = 0, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad a = \frac{m}{\beta} \quad \text{и} \quad b = \frac{m}{\beta} - 1.$$

Так как обычно $m = 4 \div 10$ (2), решение алгебраического уравнения (7), например методом итерации, не вызывает затруднений.

Число вычисляемых точек n корреляционной функции можно определить следующим образом:

$$\Delta\tau_1 \frac{p^n - 1}{p - 1} = \tau_{\text{max}},$$

или, используя (2), (6), получим

$$\frac{\beta}{mf_b} \frac{p^n - 1}{p - 1} = \frac{1}{f_n},$$

откуда

$$n = \frac{1}{\lg p} \lg \left[\frac{m}{\beta} \gamma (p - 1) + 1 \right] + 1.$$

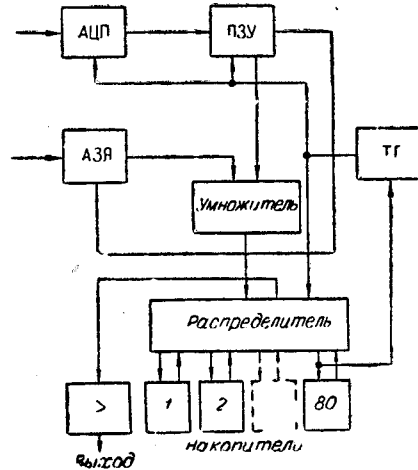
Следовательно, задавшись числом точек m на период f_b и коэффициентом начального шага β , при известном коэффициенте перекрытия исследуемых сигналов по частоте γ можно определить параметры геометрической прогрессии (5), по закону которой необходимо квантовать один из исследуемых сигналов, а также число точек $K(\tau)$, соответствующее числу каналов коррелятора.

На базе полного анализа построения оперативных корреляторов в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР разработан аналого-цифровой оперативный коррелятор КАЦО-240, предназначенный для определения авто- и взаимных корреляционных функций стационарных случайных сигналов в ритме с экспериментом. Коррелятор построен по гибридной схеме. Один из входных сигналов $x(t)$ представляется в корреляторе в аналоговой форме, другой — $y(t)$ — в цифровом коде.

Блок-схема коррелятора приведена на рисунке. Она состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), осуществляющего грубое

квантование одного из исследуемых сигналов на 4 уровня, аналоговой запоминающей ячейки (АЗЯ), в которой запоминаются ординаты другого исследуемого сигнала на время τ_{\max} , промежуточного запоминающего устройства (ПЗУ), тактового генератора (ТГ) с равномерной или переменной частотой следования импульсов, умножителя, распределителя и накопителей.

Исследуемые случайные сигналы подаются на входы коррелятора. Квантованные по уровню значения сигнала $y(t)$ в дискретные моменты времени (частота дискретизации



$f_1 = \frac{1}{\Delta\tau}$ или меняется по закону геометрической прогрессии) поступают в ПЗУ, которое состоит из двух одноконтных 80-разрядных регистров сдвига. После заполнения ПЗУ запомненные отсчеты подаются на умножитель, где перемножаются со значением сигнала $x(t_i)$, взятым в момент времени, соответствующий первому отсчету квантователя $y(t_i)$. Частота дискретизации сигнала $x(t)$ равна $f_{11} = 80 \Delta\tau$. Полученные произведения $x(t)y(t + j\Delta\tau)$ ($j=1, 2, \dots, 80$) поступают через распределитель на интеграторы, в которых образуется оценка корреляционной функции $K_{xy}(\tau)$ (4), представленная 80 точками. Результаты вычис-

лений через выходной усилитель выводятся на цифровой вольтметр, экран осциллографа или на самописец.

Возможно определение корреляционных функций в области положительных и отрицательных значений аргумента τ , а также начиная с задержки $\tau = 80 \Delta\tau$. Равномерное квантование по времени входных сигналов обеспечивает обработку сигналов с коэффициентом перекрытия по частоте порядка $\gamma = 40$ в диапазоне частот до 20 кГц. Квантование входных сигналов по времени с увеличивающимся по закону геометрической прогрессии шагом дает возможность обрабатывать широкополосные сигналы ($\gamma = 5 \cdot 10^3$) в диапазоне до 5 кГц. Шаг квантования по времени корреляционной функции: а) равномерный — $\Delta\tau = 10, 50, 500, 5000, 50\ 000$ мкс; б) переменный — $\Delta\tau_1 = 32$ мкс; $p = 1,13$. Время интегрирования $T = 3 \div 60$ мин. Аппаратурная погрешность коррелятора меньше 5%. Габаритные размеры: а) вычислительный блок $520 \times 280 \times 490$ мм; б) блок питания $200 \times 280 \times 490$ мм.

В корреляторе имеется система встроенных тестов, позволяющая осуществить проверку правильности работы блоков коррелятора.

В заключение отметим некоторые области применения оперативных корреляторов:

1) исследования в области турбулентности методом взаимной корреляции (величины максимумов взаимных корреляционных функций и время корреляции в этом случае дают четкое представление о турбулентных вихрях);

2) выделение периодического сигнала корреляционным методом на фоне шума, например при технической диагностике неисправности механизмов;

3) локализация источников акустических шумов методом взаимных корреляционных функций;

4) измерение скоростей движущихся объектов, потоков жидкостей и газов и т. п. путем определения времени запаздывания максимума взаимной корреляционной функции.

Применение корреляторов оперативного анализа в физико-технических измерениях дает возможность экспериментатору использовать статистические методы для идентификации случайных сигналов в ритме с экспериментом и осуществлять дальнейшую оперативную обработку на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Домарацкий, Л. Н. Иванов, В. И. Юшин. Корреляторы оперативного анализа.— Тр. II Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей», т. II. Новосибирск, 1969.
2. А. Н. Домарацкий, В. В. Зыков, Л. Н. Иванов. Коррелятор для исследования турбулентности в реальном масштабе времени.— Изв. СО АН СССР, серия техн. наук, 1969, вып. 3, № 13.
3. Ю. Я. Зотов. Быстродействующие корреляторы с синхронными накопителями.— Тр. II Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей», т. II. Новосибирск, 1969.
4. Hewlett-Packard Journal, november, 1969.
5. D. G. Watts. General Theory of Amplitude Quantisation with applications to correlation determination.— Proc. IRE, 1962, № 5.
6. Б. Любау. Корреляционный анализ сигналов, выполненный в реальном масштабе времени.— Электроника (русский перевод), 1966, № 22.
7. Проспект фирмы Princeton Applied Research Corp. (США). Signal correlator Model 100.

*Поступила в редакцию
17 июля 1970 г.*